



Escola d'Enginyeria de Telecomunicació i  
Aeroespacial de Castelldefels

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA

# TREBALL FINAL DE GRAU

**TÍTOL DEL TFG:** Anàlisi de correlació entre els principals indicadors en l'Aeroport de Barcelona - El Prat i l'espai aeri circumdant.

**TITULACIÓ:** Grau en Enginyeria d'Aeronavegació

**AUTOR:** Lluís Cucurull Solé

**DIRECTOR:** Marc Pérez Batlle

**DATA:** 24 d'octubre del 2017



**Títol:** Anàlisi de correlació entre els principals indicadors en l'Aeroport de Barcelona - El Prat i l'espai aeri circumdant.

**Autor:** Lluís Cucurull Solé

**Director:** Marc Pérez Batlle

**Data:** 24 d'octubre del 2017

## Resum

Tenint en compte els increments d'operacions i passatges que rep l'aeroport de Barcelona - El Prat, i les prediccions d'augment de la congestió de transit aeri que es preveuen per al 2030, la unió europea va crea una comissió per estudiar i analitzar els efectes i les necessitats que es despendran d'un augment del doble de la demanda d'avui en dia.

El projecte SESAR és la solució, la qual és un conjunt de grups de recerca per intentar assolir els objectius marcats per les necessitats dels operadors de l'espai aeri europeu i dels seus ciutadans.

En aquest projecte s'han utilitzat els principals KPI per poder analitzar i quantificar les KPA següents: capacitat, puntualitat, equitat, eficiència operacional i seguretat, que afecten a l'aeroport de Barcelona - El Prat i el seu espai aeri . Amb l'objectiu d'observar si es complien unes hipòtesis formulades i si els objectius marcats pel projecte SESAR seran possibles d'assolir en l'espai aeri que envolta l'aeroport de Barcelona. Per realitzar-ho s'han emprat diferents fonts de dades que han aportat informació diferent en cada cas i han permet analitzar diferents KPA amb les seves respectives KPI. Aquestes fonts han estat les dades NEST, les quals són dades històriques que gestiona EUROCONTROL, i les dades ADS-B rebudes pel receptor que el grup de recerca ICARUS ha instal·lat al terrat de l'EETAC.

Els resultats obtinguts en general mostren una disminució dels diferents KPI quan la capacitat es veu augmentada corroborant la gran majoria de les hipòtesis realitzades. A més a més, permeten identificar quines són les àrees que més difícil tindran assolir els objectius marcats per SESAR, les quals SESAR haurà de destinar més recursos ha estudiar-les.



**Title:** Analysis of the correlation of key performance indicators in Barcelona-El Prat surrounding airspace.

**Author:** Lluís Cucurull Solé

**Director:** Marc Pérez Batlle

**Date:** 24th October 2017

## Overview

Taking into account the increases in operations and passages received by the Barcelona-El Prat airport, and the predictions of increasing the air traffic congestion predicted by 2030, the European Union created a commission to study and analyse the effects and needs that will be deviated from an increase of twice the demand of today.

The SESAR project is the solution, which is a set of research groups trying to achieve the objectives sealed by the needs of European airspace operators and their citizens.

In this project, have been used the main KPIs in order to analyse and quantify the following KPAs: capacity, punctuality, equity, operational efficiency and safety that affect the Barcelona-El Prat airport and its airspace. In order to observe if the hypothesis formulated and the objectives set by the SESAR project will be possible to achieve in the airspace that surrounds Barcelona airport. To do so, different sources of data have been used which have provided different information in each case and have allowed to analyse different KPA with their respective KPI. These sources have been NEST data, which are historical data managed by EUROCONTROL, and the ADS-B data received by the receiver that the ICARUS research group has installed on the roof of EETAC.

In general, the results obtained show a decrease of the different KPI when capacity is increased. Corroborating the vast majority of the hypotheses made. In addition, they allow us to identify which areas will be more difficult to achieve the objectives set by SESAR, which SESAR should allocate more resources to study them.



# ÍNDIX

<b>INTRODUCCIÓ .....</b>	<b>1</b>
<b>ABREVIACIONS.....</b>	<b>3</b>
<b>CAPÍTOL 1. HIPÒTESIS.....</b>	<b>5</b>
1.1. Relacionar capacitat amb eficiència operacional .....	5
1.2. Relacionar capacitat amb seguretat (Safety) .....	6
1.3. Relacionar capacitat amb Puntualitat .....	6
1.4. Relacionar capacitat amb equitat .....	6
<b>CAPÍTOL 2. KPA i KPI .....</b>	<b>7</b>
2.1. Capacitat .....	7
2.2. Eficiència Operacional.....	7
2.3. Puntualitat i equitat.....	9
2.4. Seguretat.....	10
2.4.1 Separació entre dos avions .....	11
2.4.1.1 Separació Vertical .....	12
2.4.1.2 Separació Horitzontal.....	14
2.4.1.3 Distància entre dos punts.....	18
<b>CAPÍTOL 3. FONTS DE LES DADES DISPONIBLES .....</b>	<b>19</b>
3.1. NEST.....	19
3.1.1 Introducció .....	19
3.1.2 Dades NEST .....	19
3.2. ADS-B .....	22
3.2.1 Introducció .....	22
3.2.2 Dades ADS-B .....	23
3.2.3 Ponderació per distància .....	25
<b>CAPÍTOL 4. RESULTATS .....</b>	<b>27</b>
4.1. Capacitat .....	28
4.2. Puntualitat .....	32
4.3. Equitat .....	36
4.4. Eficiència operacional .....	39
4.5. Seguretat.....	43
<b>CONCLUSIONS.....</b>	<b>47</b>
<b>BIBLIOGRAFIA .....</b>	<b>49</b>
<b>Annex .....</b>	<b>51</b>





## ÍNDIX DE FIGURES

<b>Fig 2.1</b> Ineficiències Laterals en TMA i en ruta .....	8
<b>Fig 2.2</b> Separació vertical .....	12
<b>Fig 2.3</b> Separació vertical entre espai aeri RVSM i espai aeri no RVSM .....	13
<b>Fig 2.4</b> Separació mínima de 5 nm .....	14
<b>Fig 2.5</b> Separació mínima de 2.5 nm en aproximació final .....	15
<b>Fig 2.6</b> Estela turbulenta (Wake Vortex Turbulence) .....	16
<b>Fig 3.1</b> Sistema de comunicació ADS-B .....	23
<b>Fig 4.1</b> Número de sortides de mitjana en el cicle AIRAC 1613.....	29
<b>Fig 4.2</b> Número de sortides de mitjana en el cicle AIRAC 1703.....	29
<b>Fig 4.3</b> Número d'arribades de mitjana en el cicle AIRAC 1613 .....	30
<b>Fig 4.4</b> Número d'arribades de mitjana en el cicle ARIAC 1703 .....	30
<b>Fig 4.5</b> Número d'operacions/hora en el cicle AIRAC 1613 .....	31
<b>Fig 4.6</b> Número d'operacions/hora en el cicle AIRAC 1703 .....	31
<b>Fig 4.7</b> Retards de mitjana cicle AIRAC 1613.....	33
<b>Fig 4.8</b> Variància en els retards cicle AIRAC 1613 .....	33
<b>Fig 4.9</b> Retards de mitjana cicle AIRAC 1703 .....	34
<b>Fig 4.10</b> Variància en els retards cicle AIRAC 1703 .....	34
<b>Fig 4.11</b> Puntualitat segons Cota15 cicle AIRAC 1613.....	35
<b>Fig 4.12</b> Puntualitat segons Cota15 cicle AIRAC 1703.....	35
<b>Fig 4.13</b> Número d'operacions per companyia cicle AIRAC 1613.....	36
<b>Fig 4.14</b> Número d'operacions per companyia cicle AIRAC 1703.....	37
<b>Fig 4.15</b> Puntualitat per companyia cicle AIRAC 1613.....	37
<b>Fig 4.16</b> Puntualitat per companyia cicle AIRAC 1703.....	38
<b>Fig 4.17</b> Àrea d'estudi seleccionada per mesurar l'eficiència .....	39
<b>Fig 4.18</b> Levels-off per vol cicle AIRAC 1603.....	40
<b>Fig 4.19</b> Levels-off per vol cicle AIRAC 1703.....	40
<b>Fig 4.20</b> Minuts per vol cicle AIRAC 1613.....	41
<b>Fig 4.21</b> Minuts per vol cicle AIRAC 1703.....	41
<b>Fig 4.22</b> Milles nàutiques per vol cicle AIRAC 1613.....	42
<b>Fig 4.23</b> Milles nàutiques per vol cicle AIRAC 1703.....	42
<b>Fig 4.24</b> Número de conflictes durant cicle AIRAC 1703 .....	45
<b>Fig 4.25</b> Número de conflictes entre número de vols analitzats durant el cicle AIRAC 1703 .....	45



## ÍNDIX DE TAULES

Taula 2.1. KPI per quantificar la capacitat.....	7
Taula 2.2. KPI per quantificar l'eficiència operacional .....	9
Taula 2.3. KPI per quantificar la puntualitat.....	10
Taula 2.4. KPI per quantificar la seguretat .....	11
Taula 2.5. Classificació dels avions pel seu MTOW .....	16
Taula 2.6. Separació mínima segons WVT .....	17
Taula 2.7. Separació mínima per altitud.....	17
Taula 2.8. Quan es produeix pèrdua de separació.....	18
Taula 3.1. Els diferents camps d'una línia del fitxer .SO6 exportat de NEST ...	20
Taula 3.2. Els diferents camps d'una línia del fitxer .dat de posició aèria obtinguts del ADS-B [14].....	24
Taula 4.1 Nombre d'operacions per hora que es van realitzar durant el cicle AIRAC 1613 .....	28



# INTRODUCCIÓ

En l'actualitat, l'aviació és un element importantíssim en la societat en la que vivim. És un negoci global que connecta les persones i els negocis per facilitar i millorar les seves vides. La IATA estima que el nombre de ciutats connectades en el 2016 eren 18400, el nombre de passatges que van utilitzar l'aviació per desplaçar-se va ser d'uns 3.8 bilions i es van lliurar 54.9 milions de tones de mercaderies durant el mateix període de temps [1].

A més a més, és un factor molt important en el desenvolupament cultural i social, però sobretot en l'àmbit econòmic de la societat; ja que l'aviació juga un paper clau en el turisme i amb el comerç internacional. De fet, la IATA estima que els turistes que van viatjar amb transport aeri l'any 2016 van gastar uns 650 bilions de dòlars i l'impacte econòmic del comerç internacional mogut va ser d'uns 5.5 trilions de dòlars el any 2016. Es pot observar com el transport aeri té un impacte positiu en l'economia mundial, ja que a més dels valors mencionats, el sector genera una gran quantitat de llocs de treball, que s'estima en uns 67.7 milions l'any 2016. No obstant, aquest paper vital de l'aviació en l'economia mundial no sempre ha tingut conseqüències positives pels inversors. Però amb els esforços de les companyies aèries i les entitats que gestionen l'espai aeri per reestructura i redissenar el negoci han donat lloc a un enfortiment del sector.

La indústria va obtenir una rendibilitat de capital del 9.9% el 2016, que va superar el seu cost de capital estimat en un 6.6%. Va ser només la segona vegada que aquest sector va aconseguir aquest balanç positiu, l'altre va ser el 2015. En el 2016 el beneficis nets de la indústria van ser d'uns 34.8 bilions de dòlars d'uns ingressos de 705 bilions.

Si es traspassen alguns valors en l'Estat Espanyol és pot observar el gran impacte que té sobre aquest país. Segons dades d'AENA, l'any 2016 els aeroports d'Espanya van rebre més de 230 milions de passatges en més de 2 milions d'operacions aèries. Fet que comporta uns increments del 11.0% i 7.5% respectivament. Que segueixen la tendència de créixer com el any 2015 que van ser del 5.9% i 3.8%. I si s'observa el acumulat fins l'agost del 2017 la tendència segueix igual amb un valors del 8.3% i 5.5% en nombre de passatges i nombre d'operacions respectivament. Una tendència que afecta l'aeroport de Barcelona - El Prat, el qual és el segon aeroport més operat d'Espanya [2].

Degut a la importància que té el sector en la societat actual i el gran nombre d'operacions que es realitzen, és important que la gestió de l'espai aeri es realitzi de forma coordinada i de la manera més eficient possible. En aquesta via, amb les prediccions que la demanda augmentarà i en conseqüència l'increment d'usuaris, per tant, la possible congestió de l'espai aeri, es va crear el projecte SESAR. El qual és una col·laboració pública i privada entre les entitats europees encarregades de gestionar l'espai aeri, els serveis de navegació aèria i les companyies per buscar una solució aquest problema.

En aquest sentit, s'ha estudiat l'espai aeri circumdant de l'aeroport de Barcelona - El Prat per observar com es veuen afectades les principals aèries d'actuació en diferents escenaris i analitzar els resultats amb els objectius marcats pel projecte SESAR. El projecte s'ha realitzat a partir de dades obtingudes del receptor ADS-B situat a la l'Escola d'Enginyeria de Telecomunicació i Aeroespacial de Castelldefels, combinades amb dades històriques registrades i gestionades per EUROCONTROL.

## ABREVIACIONES

- AENA: Aeropuertos Españoles y Navegación Aeria
- AIRAC: Aeronautical Information Regulation And Control
- ACC: Area Control Centre
- ADS-B: Automatic Dependent Surveillance - Broadcast
- ANS: Air Navigation Services
- ANSP: Air Navigation Service Provider
- ATM: Air Traffic Management
- CO<sub>2</sub>: Diòxid de Carboni
- DDR2: Demand Data Repository 2
- EETAC: Escola d'Enginyeria de Telecomunicació i Aeroespacial de Castelldefels
- FL: Flight Level
- ft: Feet (unitats)
- IAC: Instrument Approach Chart
- IATA: International Air Transport Association
- ICAO: International Civil Aviation Organization
- ICARUS: Intelligent Communications and Avionics for Robust Unmanned Aerial Systems
- IDW: Inverse Distance Weighting
- IFR: Instrument Flight Rules
- KPA: Key Performance Area
- KPI: Key Performance Indicator
- MTOW: Maximum Take-Off Weight
- NEST: NEtwork Strategic Tool
- NEVAC: Network Estimation and Visualisation of ACC Capacity
- nm: Nautical Miles
- PRS: Primary Surveillance Radar
- RMA: Regional Monitoring Agency
- RVSM: Reduced Vertical Separation Minima
- SAAM: System for traffic Assignment and Analysis at a Macroscopic level

- SES: Single European Sky
- SESAR: Single European Sky ATM Rsearch
- SSR: Secondary Surveillance Radar
- STAR: Standard Terminal Arrival Route
- TMA: Terminal Manoeuvring Area
- VFR: Visual Flight Rules
- WVT: Wake Vortex Turbulence



## CAPÍTOL 1. HIPÒTESIS

SESAR és el principal projecte de recerca per a SES, una iniciativa de la Comissió Europea per al disseny, administració i regulació del espai aeri europeu. L'objectiu d'aquesta comissió és millorar l'eficiència del espai aeri per poder fer front al constant increment de la demanda.

SESAR és la col·laboració d'entitats públiques i privades per estudiar i desenvolupar un model per poder assolir els objectius marcats per SES, el projecte que intenta unifica l'espai aeri europeu per obtenir millors prestacions i rendiment.

Els objectius de SES estan en marcats en 6 blocs [3]:

- Seguretat (Security): l'objectiu és seguir garantint alts nivells de seguretat per molt que augmenti la demanda.
- Costos: l'objectiu es aconseguir reduir un 40% els costos dels proveïdors de Serveis de Navegació Aèria.
- Capacitat: aquest apartat es desenvolupa amb tres objectius diferents.
  1. El sistema ha de ser capaç d'augmentar un 100% més de tràfic.
  2. Reduir en un 30% els retards en les sortides.
  3. Augmenta les arribades en un 10% en aeroports congestionats.
- Ambiental: l'objectiu es reduir l'impacte mediambiental reduint un 10% les emissions de CO<sub>2</sub> y reduint el soroll generat.
- Eficiència operacional: reduir un 6% en el temps de vol i reduir en un 10% de combustible.
- Seguretat (Safety): Augmentar en un factor 4 la seguretat.

Tenint en compte els objectius del projecte SESAR s'ha relacionat els principals actors per observar si es compleix el que sempre s'ha mencionat que a major operacions menys eficient és el espai aeri, i a més observar si el aeroport de Barcelona - El Prat podrà complir amb aquestes demandes.

### 1.1. Relacionar capacitat amb eficiència operacional

Observar que ha major demanda la eficiència operacional es veu reduïda.

Com ha conseqüència de la hipòtesi, observar que si augmentes en un 10% la demanda del aeroport de Barcelona - El Prat no es podria obtenir la millora en eficiència operacional del 6% en temps.

Aquest apartat està relacionat amb el tema ambiental. Es pot observar que la reducció de combustible és la mateixa que de emissions de CO<sub>2</sub>, es degut que la relació d'emissions de CO<sub>2</sub> és proporcional al combustible utilitzat. Igual que si es redueix el temps de vol el soroll es veu reduït.

## **1.2. Relacionar capacitat amb seguretat (Safety)**

Observar que ha major demanda la seguretat es veu disminuïda.

Està relacionat amb l'anterior degut que al hi haver un augment de la ineficiència implica que la carga de treball del controlador augmenti possibilitant una disminució de la seguretat.

## **1.3. Relacionar capacitat amb Puntualitat**

Observar que ha major demanda la puntualitat de les companyies aèries que operen en l'aeroport de Barcelona - El Prat es veu reduïda.

Aquest també és un espectre relacionat amb la eficiència operacional, ja que ha major eficiència hauria de poder observar-se un increment de la puntualitat.

## **1.4. Relacionar capacitat amb equitat**

Observar que ha major demanda la equitat entre companyies de similar volum d'operacions no es veu afectada.

Per quantificar aquest factor es pot utilitzar indicadors de puntualitat per mesurar que no es veuen afectats de diferent forma en condicions de densitat d'operacions iguals.

## CAPÍTOL 2. KPA i KPI

Per tal de poder realitzar els estudis i quantificar els resultats obtinguts i poder extreure conclusions, i observar si es compleixen les hipòtesis mencionades en el apartat anterior; el primer pas es establir què es mesurarà i com es quantificaran per observar el sistema ATM de l'aeroport de Barcelona - El Prat.

Ja s'ha mencionat que el que es vol millorar en el projecte de SESAR són la capacitat, la seguretat (tan Safety com Security), els costos dels proveïdors ANS, la eficiència operacional i l'afectació ambiental.

Les KPA (Key Performance Area) són les àrees que es volen mesurar i les KPI (Key Performance Indicators) són els indicadors de com es quantifiquen aquestes àrees. Les àrees ha estudiar, és a dir, les KPA ja han estat mencionades en diverses vegades i són les que fan referencia al projecte SESAR.

Coneixent les KPA que es volen mesurar es proposaran uns KPI que a partir de la informació que es disposa, es podrà calcular i quantificar les diferents KPA. En el següents apartats d'aquest capítol s'expliquen quins KPI s'utilitzaran i com s'obtidran [4].

### 2.1. Capacitat

En general la capacitat en aeronàutica es pot definir com el nombre d'avions que poden se atesos en un determinat espai durant un interval de temps. Aquesta definició implica que hi ha varies indicadors que es podrien utilitzar, però tenint en compte la informació de la qual es disposa i del objectiu del treball, el KPI que s'ha considerat que s'adapta més és el de nombre d'operacions per hora, com es pot observar a la taula 2.1:

**Taula 2.1.** KPI per quantificar la capacitat

KPI	Definició
# operacions / hora	Nombre d'avions que volen en una determinada àrea de l'espai aeri: com podria ser un sector, TMA, etc. O el nombre de sortides i arribades que es realitzen en un aeroport concret durant un període de temps.

### 2.2. Eficiència Operacional

L'eficiència operacional es l'àrea encarregada de mesurar la qualitat del servei proveït. Hi ha moltes maneres de mesurar la eficiència d'un vol que esta transcorrent per una determinada àrea i durant un temps.



Per calcular la eficiència d'aquesta forma es necessitaria conèixer la trajectòria òptima de cada vol que es vulgues mesurar. Per simplificar el processat de dades i pel objectiu d'aquest treball s'ha utilitzat una simplificació de la fórmula 2.1.

Com que l'objectiu es veure com es veu afecta l'eficiència lateral en diferents escenaris el que es pot observar és la distància i el temps transcorreguts per realitzar una operació. I identificar si la mitjana i la variància varien molt en aquest diferents casos.

Amb la informació disponible es pot calcular la distància y el temps que triguen en sortir d'un sector o avions que tenen como a destí o origen el mateix aeroport. I observa si la mitjana i la variància són molt diferents per als diferents escenaris.

En la Taula 2.2 es pot veure resumides les KPI per l'eficiència operacional.

**Taula 2.2.** KPI per quantificar l'eficiència operacional

KPI	Definició
Eficiència Lateral	Comparació entre la distància i el temps requerits per sortir de una determinat espai aeri.
Eficiència vertical	Nombre de <i>level-offs</i> i/o temps de <i>level-off</i> que es produeixen en un determinat volum per cada vol.

### 2.3. Puntualitat i equitat

La puntualitat és un indicador indirecte de la capacitat i de la eficiència, ja que es una mesura de la qualitat del servei proveït en un aeroport. A més, és un indicador que mesurar la equitat entre companyies de similar volum d'operacions.

Com a KPI per aquesta àrea s'ha utilitzat el indicador de Cota15 que és el que s'utilitza avui en dia per indicar la puntualitat d'una companyia aèria.

La Cota15 és un indicador que mesura puntualitat i que indica el percentatge d'avions d'una companyia que han sortit com ha molt amb un retard de 15 minuts respecte l'hora programada. Per exemple, si una companyia un dia té 5 sortides de les quals 4 surten amb un retard inferior de 15 minuts i una sortida surt amb un retard superior als 15 minuts respecte l'hora programada, aquesta companyia tindria una puntualitat del 80%.

La Cota15 també és un indicador de l'equitat, com s'ha mencionat anteriorment. L'equitat és l'àrea que mesura si es tracten per igual o de manera molt similar les companyies, sobretot les companyies que operen de forma similar, ja que els retards podrien venir produïts per molts factors, com facturació, temps d'escala, descarrega i carrega d'equipatge de les bodegues entre vols, etc. Per això, si s'observa la puntualitat entre companyies que realitzen vols similars i tenen

estructures operatives que es realitzen aproximadament iguals, aleshores la puntualitat sí que es pot utilitzar com un indicador de l'equitat en un aeroport.

Una altre indicador per la puntualitat és el retard mig i la variància per cada vol com indiquen les fórmules 2.2 i 2.3. Aquests indicadors permetran observar retards que es produeixen i no es poden observar amb la Cota15 ja que són inferiors a 15 minuts. A més la variància també permet veure si en nombre d'avions afectats amb un retard superior, és ha dir la Cota15, és major o menor, ja que una variància alta indicaria que hi ha més avions afectats per un retard elevat.

$$Retard Mitjà = \frac{\sum_i^N R_i}{N} \quad (2.2)$$

On  $R_i$  és el retard d'un avió,  $N$  és el número total d'avions mesurats. Per tant el retard mitjà és la suma de tots els retards acumulats entre el nombre d'avions.

La variància és un indicador que expressa si els valors que s'estan observant estan molt separats de la mitjà o en general tots es mouen per uns valors similars, i per tant, com es menciona anteriorment, fa referència a retards puntuals i bastant elevats, ve expressada per la fórmula següent [6]:

$$\sigma^2 = \frac{\sum_i^N R_i^2}{N} - Retard Mitjà^2 \quad (2.3)$$

On  $\sigma^2$  és la variància,  $R_i$  és el valor del retard per l'avió  $i$ ,  $N$  és el nombre total d'avions.

**Taula 2.3.** KPI per quantificar la puntualitat

KPI	Definició
Cota15	Percentatge de vols que surten amb un retard inferior als 15 minuts.
Retard mitjà	És el retard que es produeix de mitjana.
Variància	Indicador de la varietat de resultat comparat amb la mitjà.

## 2.4. Seguretat

La seguretat es l'àrea que vetlla perquè tots els processos, infraestructures i equipaments, que s'utilitzen per la gestió del trànsit aeri, compleixin amb uns mínims; mentre investiga i comunica els incidents i accidents que es produeixen en els diferents sectors, TMA, etc.

La seguretat engloba dos grans àrees, una la seguretat (security) relacionada amb el protocols de seguretat, principalment en els aeroports. I la seguretat (safety) que fa referència a la separació entre avions quan estan operant per que no es produeixin accidents ni incidents.

Se pot extreure del paràgraf anterior que la KPI que millor defineix i permet quantifica aquesta KPA, és el nombre de pèrdues de separació que s'han produït durant un període de temps i un volum determinat.

**Taula 2.4.** KPI per quantificar la seguretat

KPI	Definició
# pèrdues de separació	Nombre de pèrdues de separació que es produeixen en un determinat volum d'operacions durant un període de temps determinat.

### 2.4.1 Separació entre dos avions

A continuació, es desenvoluparà la idea de com es realitza la separació entre avions i com s'ha aplicat en aquest projecte.

Com s'ha mencionat anteriorment, la separació és el mecanisme que s'empra per vetllar pel bon funcionament i que es mantinguin unes distàncies mínimes entre els operadors del espai aeri per no posar en risc la integritat de cap usuari.

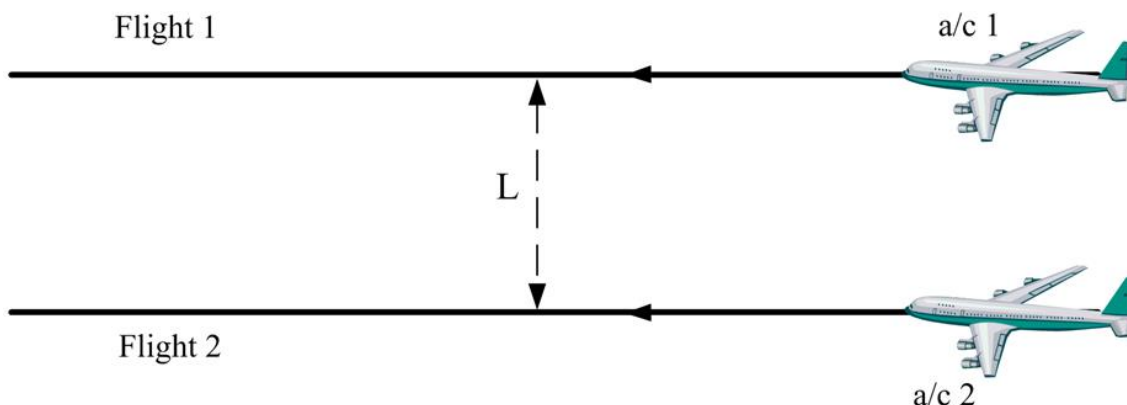
Es pot aconseguir mitjançant separació visual, la qual posa la responsabilitat de mantenir la separació en els pilots, que es poden observar en tot moment i per tant no té límits específics ni verticalment ni horitzontalment. La separació visual també la pot realitzar un controlador aeri si te contacte directe amb els dos implicats. Aquest mètode de separació és el que s'aplica majoritàriament entre dos vols VFR o en aeroports poc transitats [7].

L'espai aeri de l'aeroport de Barcelona - El Prat és un sector que només operen vols IFR i amb una operativitat elevada que no permet que la separació es realitzi de forma visual, exceptuant algun que possible moment amb bona visibilitat i en el tram de aproximació final. Per tant, la separació tant en les proximitats del aeroport, TMA i el sector de Barcelona és realitza amb separació radar, la qual té uns requeriments i uns estàndards tant horitzontalment com verticalment [8].

Hi ha diversos estàndards que són concurrents i en aquest casos s'apliquen les limitacions més restrictives. Com es pot produir si es té en compte separació radar o separació vòrtex.

### 2.4.1.1 Separació Vertical

La separació vertical és l'encarregada de mantenir una distància mínima entre avions en l'eix d'altitud com mostra la figura 2.2, on  $L$  és la separació vertical.



**Fig 2.2** Separació vertical

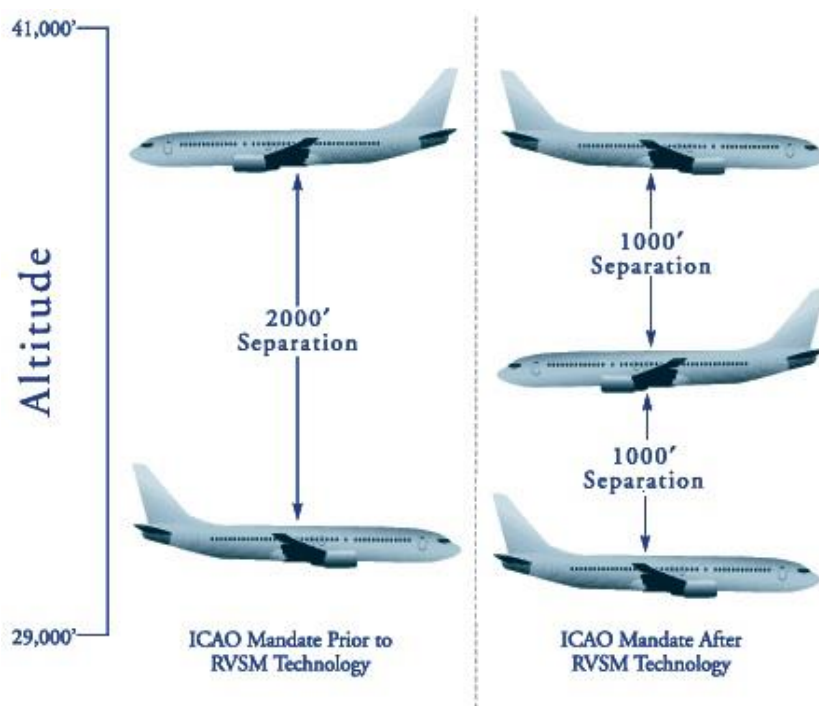
La separació vertical és aconseguida requerint als diferents operadors d'un determinat espai aeri que ajustin l'altímetre a una determinada pressió. Aquest ajust permet que tots els avions d'aquest espai operin amb les mateixes condicions. Encara que l'altímetre no marqui l'altura real respecte el terra, si que permet relacionar les altituds entre els diversos avions ja que tots estan realitzant el mateix error i la diferència d'altituds entre ells sí que és real.

La ICAO especifica que la separació vertical mínima que ha d'existir entre dos vols IFR ha de ser de 1000 ft (~300 m) per vols que es troben per sota de FL290 i ha de ser de 2000 ft (~600 m) per vols que es troben per sobre de FL290. Excepte si s'aplica RVSM (Reduced Vertical Separation Minima) [9]. El RVSM és un programa iniciat el 1982 per la ICAO per estudiar i observar la viabilitat i els requeriments necessaris per poder augmentar l'altitud on la separació mínima exigida fos 1000 ft sense comprometre la integritat i la seguretat.

El RVSM permet que entre els nivells de vol FL290 i FL410 la separació mínima sigui de 1000 ft com s'observa a la figura 2.3. Implica un augment teòric del doble en la capacitat entre aquest dos nivells de vols, i obre la oportunitat a les companyies a poder realitzar els seus vols més a prop de l'òptim de creuer de cada model d'avió i per tant disminuir el consum de combustible i conseqüentment disminuir el cost del vol.

Tot l'espai aeri Europeu té implementat aquesta mesura, ja que les infraestructures ho permeten, a més és un espai bastant congestionat i amb una gran operativitat. Europa s'apliquen totes les mesures que permeten un augment de la capacitat per poder fer front a la gran demanda que existeix sempre i quan compleixin amb els requeriments de seguretat necessaris.





**Fig 2.3** Separació vertical entre espai aeri RVSM i espai aeri no RVSM

Tot i que aquest programa està implementat a tot Europa, per tant, també a espai aeri de Barcelona, les companyies necessiten tenir el certificat d'aprovació de les seves aeronaus, altímetres i de la tripulació per poder operar en aquestes condicions. Les autoritats d'aeronavegabilitat de cada país són les encarregades de verificar i realitzar tots els test per certificar que els equips i la tripulació poden operar en RVSM.

Una vegada certificats s'identifica en el pla de vol si aquest vol està autoritzat per operar en condicions RVSM i la *European Regional Monitoring Agency* (RMA) és l'agència responsable de verificar l'aprovació de l'estatus de cada vol i informar si es produeix alguna violació.

En definitiva, en un espai aeri com el de Barcelona on està implementat el RVSM les separacions verticals queden expressades de la següent forma:

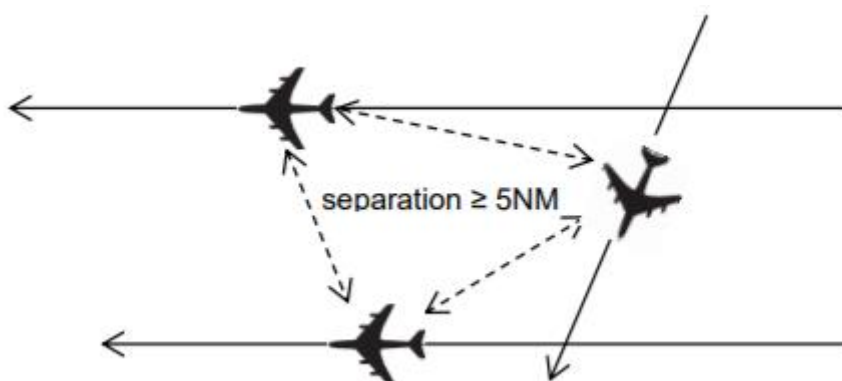
- 1000 ft fins a FL410 entre avions certificats per RVSM; 2000 ft per sobre FL410.
- 1000 ft fins a FL290 i 2000 ft per sobre per avions sense certificat RVSM tan si es comparen amb avions que tampoc tenen l'aprovació com els que si que la tenen.

Finalment, com que pràcticament tots els operadors que operen a Europa estan certificats amb RVSM i no es disposa d'informació que identifiqui quin no ho està, s'ha realitzat el projecte considerant que tots els avions que operen a Barcelona estan autoritzats a volar amb RVSM.

### 2.4.1.2 Separació Horitzontal

La separació horitzontal és la distància que hi ha entre dos avions en el mateix pla vertical. La distància mínima que es requereix depèn de les infraestructures, les ajudes a la navegació, per tan de la cobertura dels radars i la duplicitats d'aquestes.

Els estàndards quan els sistemes de vigilància estan basats amb cobertura radar o ADS-B la distància mínima requerida entre avions és de 5 nm com s'observa en la figura 2.4. Les autoritats corresponents de cada estat depenent de les radio ajudes, poden permetre disminuir aquesta distància mínima entre els operadors d'un determinat espai aeri.



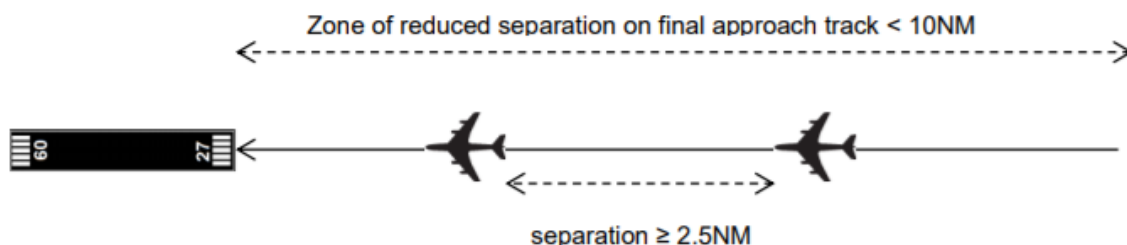
**Fig 2.4** Separació mínima de 5 nm

Les autoritats permeten una disminució de la separació mínima horitzontal quan els radars o permeten i compleixen amb els requisits següents [10].

- Quan els radars són moderns, permeten una major precisió capaçs d'habilitar la reducció de la mínima.
- Cobertura de radar secundari duplicada i un radar primari, que assegurin la disponibilitat continua d'informació sobre la posició radar i permetin prestació de serveis a aeronaus que no poden respondre als interrogatoris del radar secundari.
- Quan es pot assegurar cobertura radar des de les altituds mínimes fins les màximes en l'àrea terminal.
- S'ha de disposar de continuïtat de la cobertura del radar en les àrees que interfereixin amb l'espai aeri en ruta.
- Ha de poder donar informació com a molt cada 5 segons.

Si es compleixen aquest requeriments la distància mínima en les TMA es pot reduir fins a 3 nm. L'aeroport de Barcelona - El Prat com a zona congestionada i amb les infraestructures necessàries aplica aquesta reducció de la separació mínima necessària.

A més a més, quan dos avions estan realitzant l'aproximació final, i es troben a una distància màxima de 10 nm del principi de pista la separació mínima es pot reduir a 2.5 nm, com en la figura 2.5, si es compleixen alguns requisits.



**Fig 2.5** Separació mínima de 2.5 nm en aproximació final

Els requeriments són [10]:

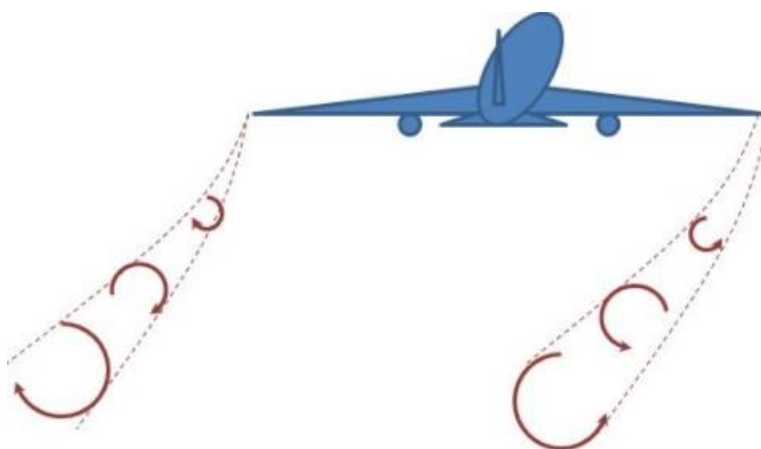
- El temps mitjà d'ocupació de la pista per on aterra l'aeronau no sigui superior a 50 segons.
- Un report de que els frens funcionen correctament.
- El temps d'ocupació de la pista no es vegi afectat negativament pels contaminants de la pista, com podria ser gel o neu.
- La continuïtat del radar i que com a mínim hi hagi un mostrat de la posició cada 5 segons.
- El controlador aeri responsable ha de poder observar, ja sigui visualment o monitoritzat els moviment i les entrades i sortides de la pista que s'utilitzarà.
- Les velocitats d'aproximació són controlades i ajustades pel controlador perquè la separació no es redueixi per sota del mínim.
- Els pilots han de sortir ràpid de la pista sempre que es pugui.
- Els procediments per aplicar separació mínima han d'estar publicats en les AIPs corresponents.

Com s'observa per poder aplicar aquest procediment hi ha molts factors externs que apliquen i dels quals no es disposa de la informació necessària. Com a conseqüència no s'ha aplicat aquest procediment per falta d'informació i per simplificar el tractament de dades. No obstant, si es produeix alguna pèrdua de separació en aproximació final inferior a 3 nm, es procedirà a observar que és el que ha succeït i si s'observa que s'ha aplicat aquest estàndard es descartarà com a pèrdua de separació.

Com s'informava hi ha diversos criteris per establir la distància mínima de separació. S'han explicat per separació radar però un dels que falta és el criteri d'estela turbulent.

L'estela turbulenta de vòrtex es defineix com la turbulència que es genera pel pas d'un avió en vol, com el que es pot observar en la figura 2.6 [11]. És generat per les puntes de les ales, les quals produeixen una significant rotació en l'aire pel qual estan passant. Aquesta pertorbació de l'aire pot tardar alguns minuts en

esvair-se. Aquesta inestabilitat de l'aire pot provocar certes turbulències i pèrdues de sustentació als avions que passen a continuació pel mateix volum d'aire.



**Fig 2.6** Estela turbulenta (Wake Vortex Turbulence)

Els potencials efectes d'aquest tipus de turbulència són més grans quan els implicats estan seguint la mateixa trajectòria. Aquesta situació es recurrent en les proximitats d'un aeroport quan es realitzen operacions d'aterratge i d'enlairament. En ruta els efectes són més grans perquè les velocitats són més elevades, però com que la separació ja és més elevada i seguir exactament la mateixa trajectòria es complica, no se sol afectar tant com en les sortides i arribades.

La separació mínima en aquest cas està tabulada i depèn de la classe de l'avió que va al davant provocant l'estela, ja que com més gran és l'avió més efecte té.

Els avions estan classificats segons el seu pes màxim d'enlairament (MTOW)

**Taula 2.5.** Classificació dels avions pel seu MTOW

	<b>MTOW</b>
<b>Lleuger</b>	Inferior a 7.000 Kg
<b>Mig</b>	Entre 7.000 Kg i 136.000 Kg
<b>Pesat</b>	Superior a 136.000 Kg
<b>Super</b>	A380

Tenint en compte la seva classificació pel seu MTOW, les distàncies que s'haurien de deixar depenent de l'avió que ha generat l'estela turbulenta són les que es poden observar en la taula 2.6.

**Taula 2.6.** Separació mínima segons WVT

<b>Avió que segueix</b>	<b>Darrere</b>	<b>Avió anterior</b>	<b>Separació mínima</b>
Pesat	Darrere	Pesat	4 nm
Mig	Darrere	Pesat	5 nm
Lleuger	Darrere	Pesat	6 nm
Lleuger	Darrere	Mig	5 nm
Mig	Darrere	A380	6 nm
Pesat	Darrere	A380	7 nm
Lleuger	Darrere	A380	8 nm

S'observa que són més restrictius que les 3 nm o les 2.5 nm. Per tant en aquest casos s'hauria d'aplicar aquestes restriccions.

Tenint en compte que els avions lleugers no poden operar en l'aeroport de Barcelona - El Prat i que el nombre d'avions pesats i A380 que operen en Barcelona són molt pocs, i no es disposa d'informació per conèixer el model d'avió que s'està observant, ni de una base de dades per identificar quina classe és. En aquest projecte tenint en compte aquestes consideracions s'ha optat per no aplicar la separació per turbulència, com que són pocs casos i surten fora de la operativa habitual, els controladors els tenen controlats i es confia que en aquest casos s'asseguren de complir sempre la separació mínima.

Finalment, per acabar aquesta secció s'ha optat per limitar a FL250 que és l'altitud en que es limita i on pràcticament comencen totes les STARS com altitud on es pot aplicar la separació de 3 nm.

Amb la informació que es disposa i aplicant la normativa explicada anteriorment la separació mínima requerida per sectors és:

**Taula 2.7.** Separació mínima per altitud

<b>Altitud de vol</b>	<b>Separació mínima horitzontal [nm]</b>	<b>Separació mínima vertical [ft]</b>
h < FL250	3	1000
FL250 - FL410	5	1000
h > FL410	5	2000

Tenint en compte les separacions mínimes tant horitzontalment com verticalment per a cada sector, la taula 8 descriu quan s'ha comptabilitzat en aquest projecte que es produeix una pèrdua de separació entre avions.

**Taula 2.8.** Quan es produeix pèrdua de separació

Nivell de vol	Separació vertical	Separació horitzontal	Hi ha pèrdua de separació?
$h < \text{FL250}$	$> 1000 \text{ ft}$	$> 3 \text{ nm}$	No
$h < \text{FL250}$	$> 1000 \text{ ft}$	$< 3 \text{ nm}$	No
$h < \text{FL250}$	$< 1000 \text{ ft}$	$> 3 \text{ nm}$	No
$h < \text{FL250}$	$< 1000 \text{ ft}$	$< 3 \text{ nm}$	Si
$\text{FL250} - \text{FL410}$	$> 1000 \text{ ft}$	$> 5 \text{ nm}$	No
$\text{FL250} - \text{FL410}$	$> 1000 \text{ ft}$	$< 5 \text{ nm}$	No
$\text{FL250} - \text{FL410}$	$< 1000 \text{ ft}$	$> 5 \text{ nm}$	No
$\text{FL250} - \text{FL410}$	$< 1000 \text{ ft}$	$< 5 \text{ nm}$	Si
$h > \text{FL410}$	$> 2000 \text{ ft}$	$> 5 \text{ nm}$	No
$h > \text{FL410}$	$> 2000 \text{ ft}$	$< 5 \text{ nm}$	No
$h > \text{FL410}$	$< 2000 \text{ ft}$	$> 5 \text{ nm}$	No
$h > \text{FL410}$	$< 2000 \text{ ft}$	$< 5 \text{ nm}$	Si

#### 2.4.1.3 Distància entre dos punts

Per calcular la distància de separació entre dos avions, s'ha utilitzat la fórmula de Haversine la qual calcula la distància de cercle màxima entre dos punts d'una esfera coneixent les seves latituds i longituds [12]. Com que coneixem les latituds i longituds dels avions podem aplicar aquesta fórmula per obtenir la distància entre els diferents avions. En la fórmula 2.4 es pot observar la expressió de com s'ha calculat la distància.

$$d = 2r \arcsin \left( \sqrt{\sin^2 \left( \frac{\phi_2 - \phi_1}{2} \right) + \cos(\phi_1) \cos(\phi_2) \sin^2 \left( \frac{\lambda_2 - \lambda_1}{2} \right)} \right) \quad (2.4)$$

On  $r$  és el radi de la terra, que s'ha pres com a 6371 km. Per ser precís el que s'hauria de realitzar és un radi que estigues format per el radi de la terra més l'alçada en la que es troben els avions, però aquestes alçades haurien de ser GNSS i a més la diferència de la que es parla és inferior al 0.15 %, no és eficient i suma un temps de processat molt gran sense aportar una gran millora. On  $\phi_1$  i  $\phi_2$  són les latituds dels dos punts i  $\lambda_1$  i  $\lambda_2$  són les longituds dels dos punts.

## **CAPÍTOL 3. FONTS DE LES DADES DISPONIBLES**

Per tal d'observar i assolir els objectius d'aquest projecte, s'han analitzat dades per intentar corroborar les hipòtesis plantejades i utilitzant els procediments teòrics anteriorment esmentats. Les dades emprades proveeix de dues fonts diferents les quals ens permeten obtenir informació diferent i en conseqüència s'utilitzen per comprovar i mesurar KPA i KPI diferents.

Les dues fonts són les dades NEST que s'obtenen del portal DDR2 d'EUROCONTROL i les dades ADS-B emeses pels diferents avions que operen l'aeroport de Barcelona - El Prat que disposen d'aquesta tecnologia i que són rebudes pel receptor del grup de recerca ICARUS situat al terrat de la ETTAC.

### **3.1. NEST**

#### **3.1.1 Introducció**

NEST és una eina que neix de la combinació de SAAM i NEVAC com una aplicació d'escriptori independent. NEST es utilitzada tant pels administradors de la xarxa d'EUROCONTROL i els diferents proveïdors de serveis de cada país (ANSP) amb la finalitat de:

- Dissenyar i desenvolupar l'estructura del espai aeri.
- Planificació de la capacitat i l'anàlisi post operacions.
- Analitzar i organitzar estratègicament el flux de trànsit.
- Preparació d'escenaris per simulacions ràpides i simulacions a temps real.

En definitiva el NEST es utilitzat per una optimització dels recursos que es disposen i millorar el rendiment de la xarxa i espai aeri.

#### **3.1.2 Dades NEST**

Les dades NEST s'obtenen d'una base de dades de la xarxa de rutes europees mantinguda per EUROCONTROL. En la pagina web del DDR2, es poden descarregar els històrics de tràfic per dia o per cicles AIRACs finalitzats. A més, es poden descarregar els dies del cicle AIRAC actual que ja han finalitzat.

Una vegada descarregats els arxius desitjats, quan ja es disposa de les dades NEST, es pot utilitzar el programa per filtrar dades aplicant diversos criteris als arxius NEST de referència.

A partir d'aquestes modificacions es poden exportar arxius de NEST amb diferents formats. El més utilitzat i el que s'ha emprat per realitzar aquest estudi és el que exporta un arxiu de text '.SO6', que es compatible amb Excel.

És el format més emprat perquè descriu les rutes dels avions amb trajectòries 4D. Cada línia del fitxer descriu un segment volat per un determinat avió. Un vol sencer està format per varies línies, que representen tots els segments, des de el primer que és la sortida de un determinat aeroport, fins l'últim segment que representa l'arribada al aeroport destí.

Cada línia està formada per 20 camps diferents que corresponen a diferents paràmetres per descriure el segment. Els diferents caps es poden veure a la taula 3.1.

**Taula 3.1.** Els diferents camps d'una línia del fitxer .SO6 exportat de NEST

#	Nom	Definició
1	Identificació del segment	Nom que identifica el segment i està format pel nom on comença més el nom d'on acaba el segment.
2	Aeroport d'origen	Codi ICAO de l'aeroport d'origen
3	Aeroport de destí	Codi ICAO de l'aeroport de destí
4	Model d'avió	Codi ICAO del model d'avió
5	Hora inicial del segment	Hora d'entrada al segment, format HHMMSS
6	Temps final del segment	Hora de sortida del segment, format HHMMSS
7	FL inicial del segment	Nivell de vol d'entrada al segment
8	FL final del segment	Nivell de vol de sortida del segment
9	Estat	0=ascens, 1=descens i 2=creuer
10	Indicador	Indicador amb el codi ICAO de la companyia aèria
11	Data inicial del segment	Data d'entrada al segment, format AAMMDD
12	Data final del segment	Data de sortida del segment, format AAMMDD
13	Latitud inicial del segment	Latitud d'entrada al segment en minuts decimals
14	Longitud inicial del segment	Longitud d'entrada al segment en minuts decimals
15	Latitud final del segment	Latitud de sortida del segment en minuts decimals
16	Longitud final del segment	Longitud de sortida del segment en minuts decimals
17	Identificació del vol	Identificador únic pel vol
18	Seqüència del sector	Indicar quin segment del vol és. Per exemple 5 pel cinquè segment del vol
19	Longitud del sector	Longitud del segment en nm
20	Color del segment	Color de codificació de SAAM (0-9)



Exemples:

```
LEBL_!HknZ LEBL UUEE A320 225400 225430 0 10 0 AFL2513 161207 161207
2477.816667 124.700000 2477.700000 126.166667 202937373 1 1.108081 0
```

```
!HknZ_!Hkna LEBL UUEE A320 225430 225450 10 10 2 AFL2513 161207
161207 2477.700000 126.166667 2477.583333 127.616667 202937373 2
1.095662 0
```

```
!Hkna_!Hknb LEBL UUEE A320 225450 225520 10 20 0 AFL2513 161207
161207 2477.583333 127.616667 2477.466667 129.083333 202937373 3
1.108146 0
```

...

```
!Hygq_!HvVy LEBL UUEE A320 031342 031431 20 15 1 AFL2513 161208
161208 3356.850000 2237.750000 3357.416667 2240.383333 202937373 98
1.579510 0
```

```
!HvVy_UUEE LEBL UUEE A320 031431 031600 15 0 1 AFL2513 161208
161208 3357.416667 2240.383333 3358.350000 2244.783333 202937373 99
2.633624 0
```

En aquest exemple es pot observar com es tracta d'un vol que va de Barcelona - El Prat (LEBL) a l'aeroport Internacional de Moscou - Sheremetyevo (UUEE). El vol sense esta format per 99 segments com es pot observar a l'última línia que correspon a l'arribada a Moscou.

La gran utilitat d'aquest programa és que permet extreure i per tan treballar amb diverses trajectòries. Permet treballar amb les trajectòries programades per les companyies i com que els arxius es van penjant amb alguns dies de retràs, també permet treballar amb les trajectòries reals, és a dir, amb les trajectòries que finalment s'han realitzat.

Aquesta varietat d'informació és la que permet tractar aspectes com la operativitat que s'ha produït en cada moment al aeroport de Barcelona i com que es disposa d'informació planificada i d'informació real, també permet comparar-les i observar els retards produïts per la operativa diària.

Com es pot observar a la taula anterior 3.1, es disposa de molta més informació que no té un aspecte bàsicament temporal com són la capacitat, els retards i la puntualitat, els temes tractats amb aquesta font d'informació. Però el grup de recerca ICARUS en el seu moment va comprovar que la informació que no es temporal, com podria ser la posició, no són precises i es devien de les trajectòries reals. Per aquest motiu pel tractament de la posició i altitud s'empra l'altra font d'informació de la qual es disposa, que són les dades ADS-B.

## 3.2. ADS-B

### 3.2.1 Introducció

ADS-B és una tècnica de vigilància que es basa en l'emissió automàtica d'informació per part dels operadors del espai aeri o d'infraestructures aeronàutiques, ja siguin avions o vehicles terrestres que estan treballant per la superfície l'aeroport que podrien afectar a la operativa. Transmeten informació sobre la seva identitat, posició i altra informació derivada dels sistemes que porten els avions a bord (GNSS, etc.). Aquesta senyal emesa (ADS-B out) pot ser rebuda i processada per vigilància per estacions de terra o a bord d'altres avions que disposin d'un receptor (ADS-B in) per obtenir informació sobre l'estat del trànsit, separació, etc [13].

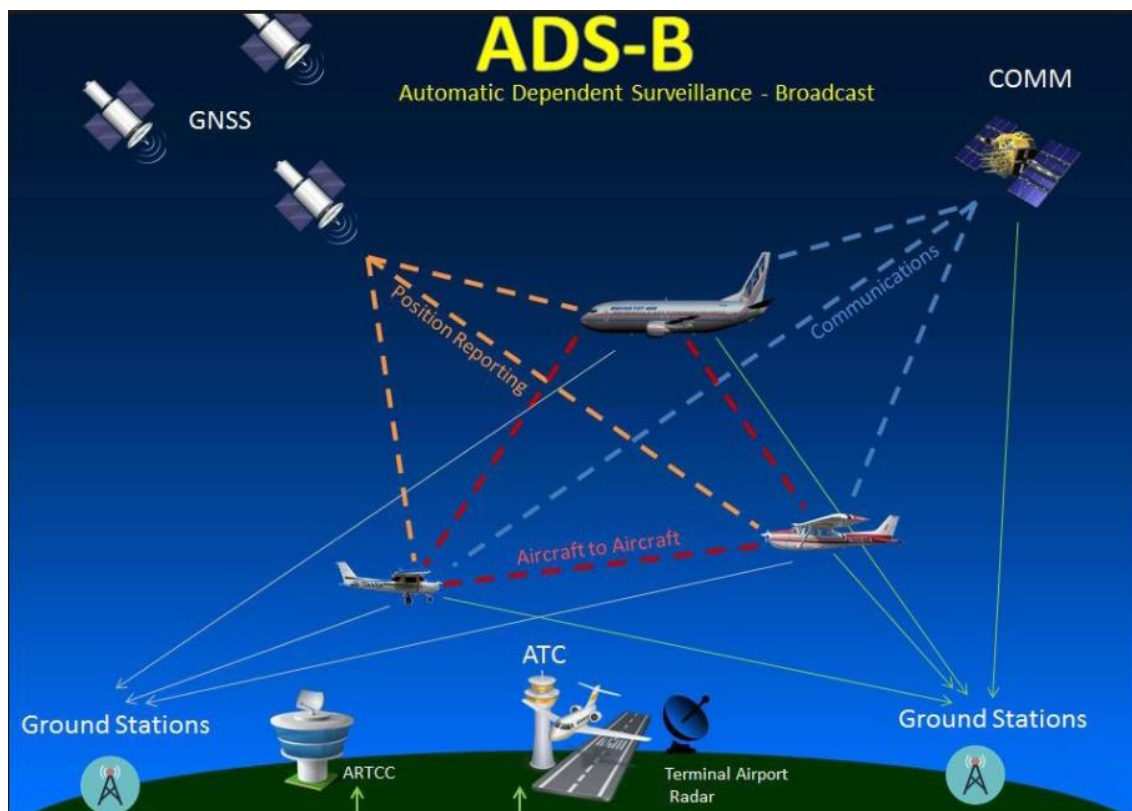
ADS-B és una tècnica automàtica perquè no requereix d'un estímul extern per emetre; és dependent perquè es basa en sistemes a bord que proporcionen informació de vigilància a altres parts. Quan les dades s'emeten, la font d'origen no té coneixement de qui rep les dades ja que no hi ha cap interrogatori o contacte bidireccional.

ADS-B és veu com un proveïdor clau pel futur de la xarxa ATM i és una eina vital per assolir els objectius marcats per SES. Per aquest motiu a partir del 7 de Desembre del 2017 serà obligatori la seva implementació en tots els avions que operin en l'espai europeu. Actualment, com que a Europa no es obligatori per a tots els avions, no tots el porten implantat i activat. Conseqüentment, no es pot utilitzar aquesta informació per obtenir el nombre d'operacions que realitza l'Aeroport de Barcelona. Però com que hi ha un gran nombre d'avions que ja el porta implantat si que es pot utilitzar per aproximar i observar altres aspectes importants de la operativa de l'Aeroport de Barcelona - El Prat.

Les dades emeses pel ADS-B, ja siguin pels avions o pels vehicles, són rebudes per les estacions terrestres. Les quals s'envien als sistemes de processament i distribució de dades de vigilància on es fonen amb altres dades obtingudes per altres fonts, com per exemple SSR i PSR, per obtenir informació de com esta el trànsit aeri.

En la figura 3.1 és pot observar el funcionament i com un avió informa als demes avions que comparteixen un mateix espai aeri perquè puguin estar informats. A més a més, segueix informant a les diferents estacions terrestres perquè puguin emprar aquesta informació com sigui necessària per mantenir la seguretat.

Aquest sistema és útil en espais aeris congestionats com poden ser Europa o USA, ja que a més dels controladors aeris permet que els avions que comparteixin un mateix espai estiguin en tot moment informats. No obstant, un dels grans avantatges que té aquest sistema respecte els sistemes de vigilància habituals com podrien ser els radars, és en les rutes Nord Atlàntiques on la cobertura radar no sol ser bona i aquest sistema permet que el gran nombre d'avions que operen aquestes rutes o puguin fer amb seguretat i informació.



**Fig 3.1** Sistema de comunicació ADS-B

### 3.2.2 Dades ADS-B

En el cas del receptor emprat per aquest projecte i que es troba situat a la terrassa de l'EETAC, les dades són guardades en un fitxer per dia. El grup de recerca ICARUS ha desenvolupat un programa que permet convertir els fitxers descodificats, els quals no poden ser llegits o tractats fàcilment, en un format llegible i operable per a l'usuari.

El que s'obté i és des d'on s'ha treballat en aquest projecte, és una carpeta per cada vol que esta composta per diversos arxius '.dat' amb diferent informació. Per realitzar els estudis d'aquest treball s'han utilitzat bàsicament els arxius de posició. Hi ha dos tipus de arxius de posició, un que representa quan el vol està rodant per aeroport i un altre quan està volant. El més utilitzat ha estat el que dona informació quan l'avió es troba volant i cos del missatge té l'aspecte que es pot observar en la taula 3.2.

**Taula 3.2.** Els diferents camps d'una línia del fitxer .dat de posició aèria obtinguts del ADS-B [14]

#	Nom	Definició
1	Tipus de missatge	ADSBPOSITIONAIR: indica que és un missatge de la posició aèria del avió
2	Temps Unix	Nombre de segons des de les 0 hores de la matinada de 1 de gener de 1970 UTC fins al moment actual
3	ICAO del vol	Identificador únic del transponder
4	Latitud	Latitud en graus decimals
5	Longitud	Longitud en graus decimals
6	Altitud	Altitud en peus
7	Tipus d'altitud	Indica el tipus d'altitud mesurada. Normalment baromètrica però de vegades pot ser GNSS

Exemples:

ADSBPOSITIONAIR 1483029004.4 000a0075 42.917346 5.191563 36000  
Barometric

El qual ens indica que el vol amb identificador 000a0075 amb temps unix 1483029004.4 segons es trobava a la latitud 42.917 graus decimals en una longitud de 5.192 graus decimals a una altitud baromètrica de 36000 ft.

La informació que proporciona el ADS-B és informació de posició, la qual permet treballar les KPA d'eficiència i de seguretat.

Els sistemes ADS-B com s'ha mencionat emeten la seva informació automàticament, i al no haver un senyal que preguntis en un instant determinat esperis que el responguin, la informació que es rep no sempre s'envia en el mateix moment. Aquí sorgeix un problema alhora de comparar vols i observar la seva separació. Aquest problema es suma al de l'altitud, que pot ser enviat en diferents formats, baromètric o GNSS.

Per solucionar el tema de l'altitud, com que la normativa i els estàndards marquen que la separació vertical, ja sigui de 1000 ft o 2000 ft ha de ser baromètrica, s'ha optat per modificar els que tinguessin la informació en GNSS a baromètrica. S'ha pogut fer ja que en un dels arxius del ADS-B s'indica quina es la diferència entre l'altitud GNSS i la baromètrica.

En el cas del temps i per tant que afecta a les longituds, latituds i altituds quan es volen comparar per si s'ha produït alguna pèrdua de separació entre dos avions. Per solucionar aquest problema s'ha ponderat els resultats utilitzant la ponderació per distància (IDW)

### 3.2.3 Ponderació per distancia

La ponderació per distancia inversa (IDW) és un tipus de mètode determinista per a la interpolació multivariant amb un conjunt de punts dispersos coneguts. On els valors assignats a punts desconeguts es calculen amb una mitjana ponderada de diversos punts coneguts depenent de la seva proximitat respecte el punt en qüestió del que s'està intentant obtenir el valor [15].

La fórmula general és:

$$\hat{Z}_j = \sum_{i=1}^n K_{ij} Z_i \quad (3.1)$$

On  $\hat{Z}_j$  és el valor estimat per al punt j, n és el número de punts utilitzats per realitzar la ponderació, que en aquest projecte s'ha optat per utilitzar 4 punts,  $Z_i$  és el valor en el punt i conegut, i  $K_{ij}$  el pes associat al punt i en el càlcul del punt j. Els pesos  $K_{ij}$  varien de 0 a 1, donant major valor als punts més propers a j, i el total de ells és la unitat.

Per establir una relació entre el pes i la distancia, la fórmula 3.1 és substituïda per la fórmula 3.2.

$$\hat{Z}_j = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{Z_i}{d_{ij}^\beta}}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{d_{ij}^\beta}} \quad (3.2)$$

On  $d_{ij}$  és la distancia entre el punt que és vol trobar valor j i el punt i que és conegut.  $\beta$  és un exponent de ponderació que controla la forma en la que el pes disminueix amb la distancia. Per aquest treball s'ha utilitzat un factor 2 perquè és el més utilitzat i al utilitzar 4 punts dona bastanta més importància als punts més propers.

A continuació es mostrarà un exemple de com s'ha aplicat aquesta condició en aquest projecte.

Considerant que es tenen dos vectors, un de temps de longitud n i un de latitud que correspon a la latitud que es té en cada un dels instants de temps del vector temps, per tan, també té una longitud n. Per que sigui més visual s'utilitzarà dos vectors inventats i es mostrarà el procés.

Vector temps [2.20, 2.80, 3.30, 3.90, 4.20]

Vector latitud [40.20, 41.80, 42.10, 44.50, 45.00]

Es vol conèixer el valor que tindria la latitud quan el temps fos 3.5. El que s'ha aplicat en aquest projecte es conèixer la situació del valor dins del vector i escollir dos valors ha la seva dreta de la posició i dos valors cap a l'esquerra. Si fos el cas que no hi haguessin dos posicions cap un dels costats només s'utilitzaria una posició, per exemple si es vulgues conèixer el valor quan el temps fos 4, s'utilitzarien dos valors de l'esquerra i l'únic valor que queda per la dreta.

Tornant al cas de l'exemple s'emprarien els valors de les posicions 1, 2, 3 i 4 dels vectors (considerant que es comença per la posició 0 a l'esquerra). Tenint en compte aquest conceptes, els temps utilitzats són 2.8, 3.3, 3.9 i 4.2. Amb aquest valors podem obtenir les diferents distàncies entre els punts coneguts i el desitjat a conèixer. Els valors coneguts de latitud són 41.8, 42.1, 44.5, 45.0.

Utilitzant la fórmula 3.2 s'obté que el valor de la latitud quan el temps és 3.5 és:

$$\hat{\theta}_{3.5} = \frac{\frac{41.8}{|3.5 - 2.8|^2} + \frac{42.1}{|3.5 - 3.3|^2} + \frac{44.5}{|3.5 - 3.9|^2} + \frac{45.0}{|3.5 - 4.2|^2}}{\frac{1}{|3.5 - 2.8|^2} + \frac{1}{|3.5 - 3.3|^2} + \frac{1}{|3.5 - 3.9|^2} + \frac{1}{|3.5 - 4.2|^2}} = 42.67 \text{ Graus}$$

## CAPÍTOL 4. RESULTATS

En aquest apartat es mostren els resultats obtinguts i l'afectació a les hipòtesis inicials plantejades.

Perquè els resultats tinguessin un mínim de valor i fiabilitat s'han analitzat 2 cicles AIRAC, 28 dies cadascun. Amb aquests pràcticament dos mesos l'aeroport de Barcelona - El Prat ha estat operat per aproximadament 40000 vols. Aquesta xifra de 40000 vols analitzats, és un valor suficientment gran per poder observar les tendències que es produeixen en diferents escenaris en l'Aeroport de Barcelona.

Els cicles AIRAC analitzats han estat el 1613, que començava el 8 de Desembre de 2016 i acabava el 4 de Gener de 2017. El cicle AIRAC 1703, començava el 2 de Març de 2017 i acabava el 29 de Març de 2017.

S'ha optat per aquest dos mesos ja que eren els dos mesos més propers dels que es disposava informació i no estaven afectats pel tancament de una de les pistes, com succeïa amb els cicles AIRAC 1701 i 1702, per les obres de millora del paviment.

Dins d'aquest dos cicles AIRAC s'ha analitzat les KPA i KPI en tres escenaris diferents. Aquest escenaris han estat marcats per la operativitat en determinades hores de l'Aeroport de Barcelona - El Prat. La màxima operativa de l'aeroport de Barcelona és de 72 operacions per hora.

Considerant que el màxim operacions per hora que és pot produir a l'aeroport de Barcelona és de 72 s'ha establert els tres escenaris de baixa, mitjà i alta operativitat. Que corresponen quan l'aeroport està operant entre un 0 % un 33,33 %, entre 33,33 % i un 66,66 % i del 66,66 % fins al màxim de 72 operacions hora respectivament.

Baixa operativa implica quan s'estan realitzant entre 0 i 24 operacions hora. Mitjà quan es produeixen entre 25 i 48 operacions hora. Alta quan hi ha entre 49 i 72 operacions hora.

A continuació, es mostraran els diferents resultats obtinguts per les diferents àrees d'anàlisi en els diferents escenaris i s'analitzaran per observar si s'han complert les hipòtesis inicials. Per altra banda, com que es disposen de resultats en diferents casos de capacitat, on un dels quals representa 3 vegades més d'operacions que l'altre, i un dels objectiu principal de SESAR és augmentar la capacitat en un factor 2-3, permetrà observar on es podrien produir possibles problemes si l'aeroport de Barcelona incrementes la operativa que es dur a terme avui en dia.

## 4.1. Capacitat

En aquest subapartat s'analitzarà la operativitat de l'aeroport de Barcelona - El Prat.

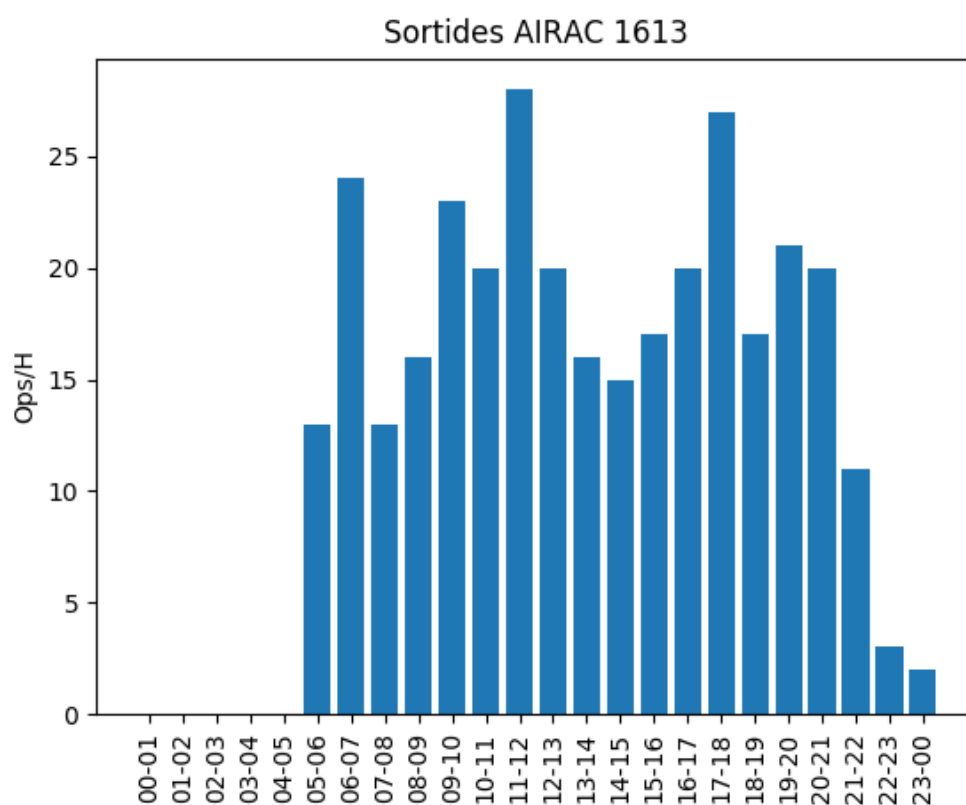
En la taula 4.1 es mostra el nombre d'operacions que es van realitzar per hora cada dia durant el cicle AIRAC 1613.

**Taula 4.1** Nombre d'operacions per hora que es van realitzar durant el cicle AIRAC 1613

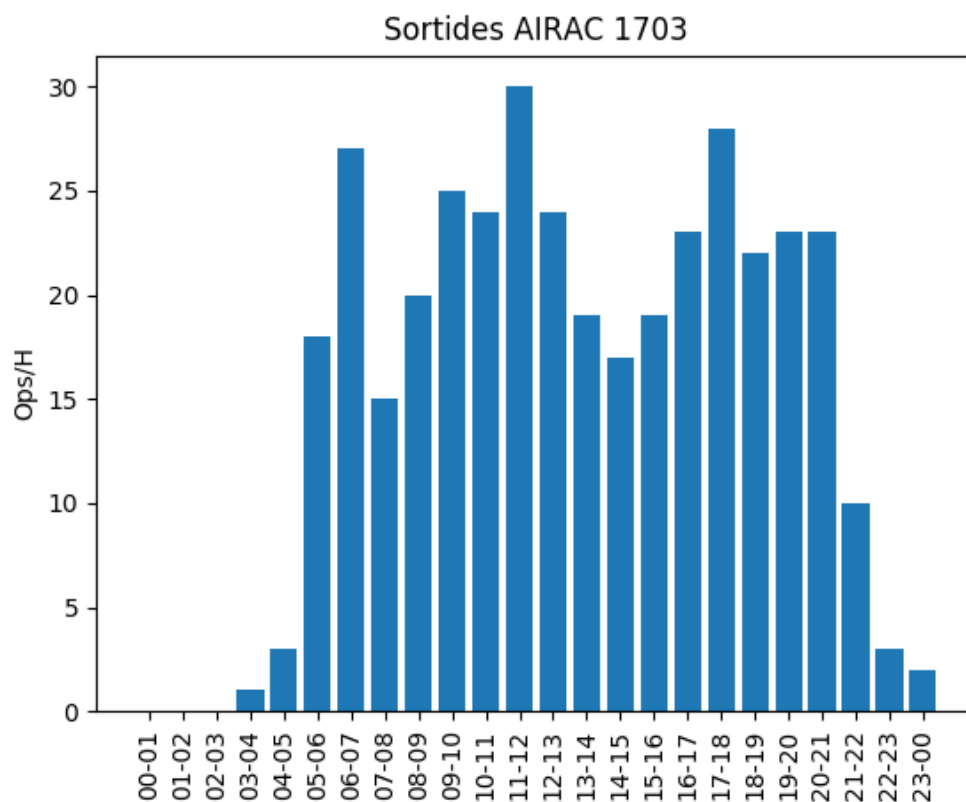
	DIES entre 08/16/2017 i 04/01/2017																																
Hores	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	1	2	3	4					
00:00 - 01:00	1	0	2	0	2	0	1	1	1	6	2	2	2	0	0	2	4	1	1	1	1	0	4	4	1	4	5	0					
01:00 - 02:00	0	0	0	1	1	1	0	0	0	1	0	1	1	1	0	1	0	1	0	0	0	0	0	1	0	1	2	0					
02:00 - 03:00	0	3	0	0	2	0	1	0	0	1	0	0	1	0	1	0	1	0	0	1	0	0	1	3	0	1	0	0					
03:00 - 04:00	1	4	1	1	3	1	2	2	0	2	1	4	1	0	1	1	2	0	1	2	1	1	2	3	0	2	1	2					
04:00 - 05:00	3	4	4	2	0	5	5	3	4	2	2	2	2	5	4	4	6	2	0	7	6	7	4	3	1	2	4	5					
05:00 - 06:00	19	20	18	18	18	16	19	22	21	21	15	18	22	20	17	19	22	7	9	14	16	13	16	21	7	17	19	15					
06:00 - 07:00	37	26	25	14	38	33	39	37	36	26	18	40	38	42	41	33	32	4	35	37	37	37	32	25	11	38	36	36					
07:00 - 08:00	37	33	24	23	42	37	39	35	30	28	21	39	32	38	31	43	32	5	34	30	36	28	37	25	12	51	27	35					
08:00 - 09:00	44	34	40	38	43	38	42	46	40	33	31	45	40	53	46	43	41	13	27	37	43	42	43	40	19	39	38	36					
09:00 - 10:00	50	51	47	48	55	37	51	42	56	48	42	51	46	51	50	59	56	18	53	54	51	53	51	51	41	57	43	47					
10:00 - 11:00	54	41	30	38	48	33	37	36	40	34	38	43	36	45	48	48	47	20	47	41	41	46	56	43	35	52	38	35					
11:00 - 12:00	45	50	53	64	56	44	45	51	47	41	50	53	40	48	49	56	52	25	56	48	56	52	55	58	53	65	53	41					
12:00 - 13:00	61	40	33	34	46	21	33	39	44	30	32	45	25	36	44	50	44	19	48	43	45	43	57	48	43	54	34	29					
13:00 - 14:00	26	31	27	42	43	23	28	26	34	25	30	33	20	32	30	36	33	12	37	28	38	33	35	28	30	43	22	32					
14:00 - 15:00	34	39	28	48	37	35	28	37	45	26	38	34	36	30	46	47	21	21	44	39	36	37	40	23	48	43	34	36					
15:00 - 16:00	44	45	30	51	42	36	32	39	47	29	49	43	32	36	39	47	37	21	47	44	38	45	48	39	42	53	45	34					
16:00 - 17:00	45	51	32	62	52	38	43	43	52	35	51	44	42	47	52	55	27	25	57	46	49	48	53	40	61	48	47	35					
17:00 - 18:00	56	59	38	58	44	44	52	52	60	30	63	45	46	52	51	60	24	41	52	56	52	44	55	31	57	47	43	45					
18:00 - 19:00	51	53	14	62	43	43	44	50	52	23	50	44	39	39	50	60	16	34	58	47	44	57	59	25	53	58	44	38					
19:00 - 20:00	50	51	24	66	55	43	49	55	60	24	60	49	48	53	59	67	10	41	55	43	45	54	53	21	66	57	42	45					
20:00 - 21:00	39	41	22	55	42	36	40	41	55	16	52	48	37	49	44	53	9	24	48	38	43	46	51	10	54	47	35	40					
21:00 - 22:00	27	35	12	46	29	25	27	28	35	13	41	36	26	33	34	34	10	27	31	30	29	33	37	12	44	32	25	29					
22:00 - 23:00	22	29	16	27	26	23	23	23	28	13	33	24	24	27	32	29	0	13	29	23	24	27	35	2	35	32	24	22					
23:00 - 24:00	3	8	5	8	4	1	3	5	17	6	15	6	7	4	5	25	1	4	7	5	5	6	27	3	16	16	5	7					

S'observa que entre les hores compreses entre les 23:00 i les 05:00 es quan menys s'opera l'aeroport de Barcelona i són franges horàries on hi ha un potencial d'explotació molt gran. En les demes hores es complicat a partir de la taula observar altres influències. Per això, s'han realitzat gràfiques per franges horàries que es poden observar en les següents imatges. On s'observa l'operativa de Barcelona de mitjana en les diferents franges horàries i en funció de si són sortides o arribades.

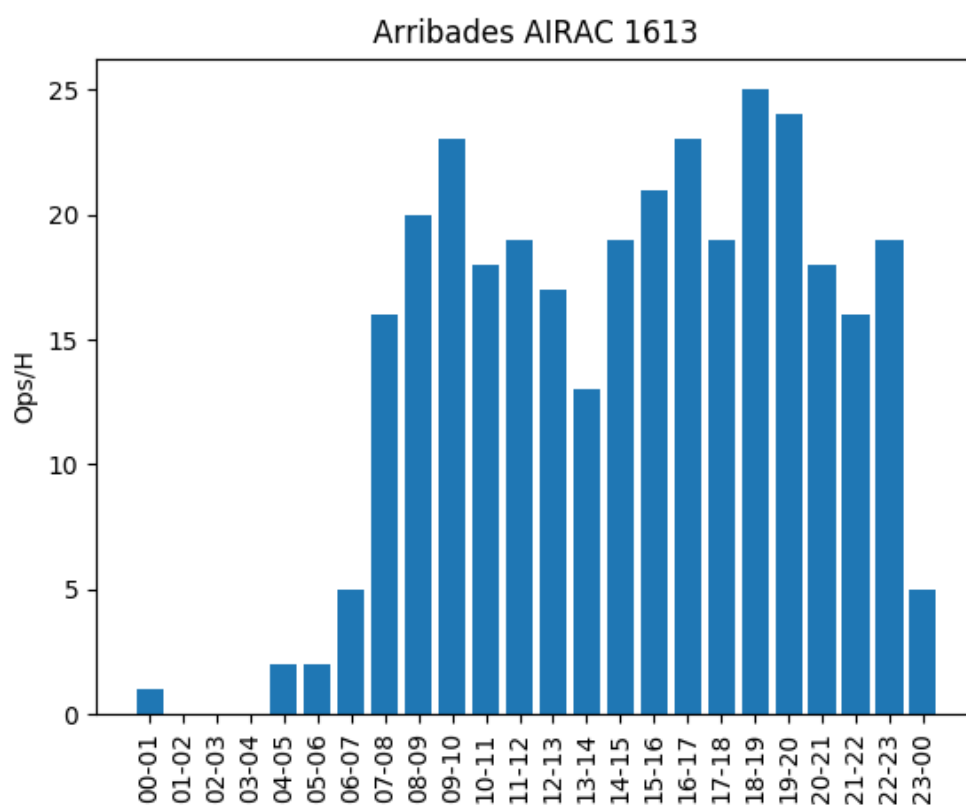




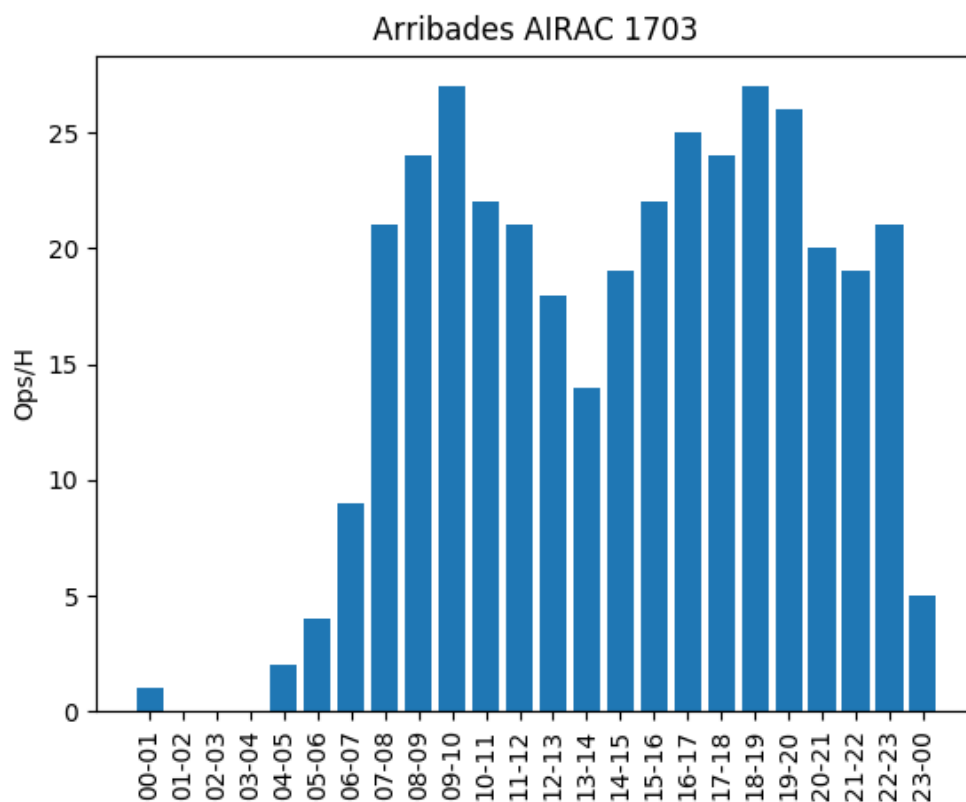
**Fig 4.1** Número de sortides de mitjana en el cicle AIRAC 1613



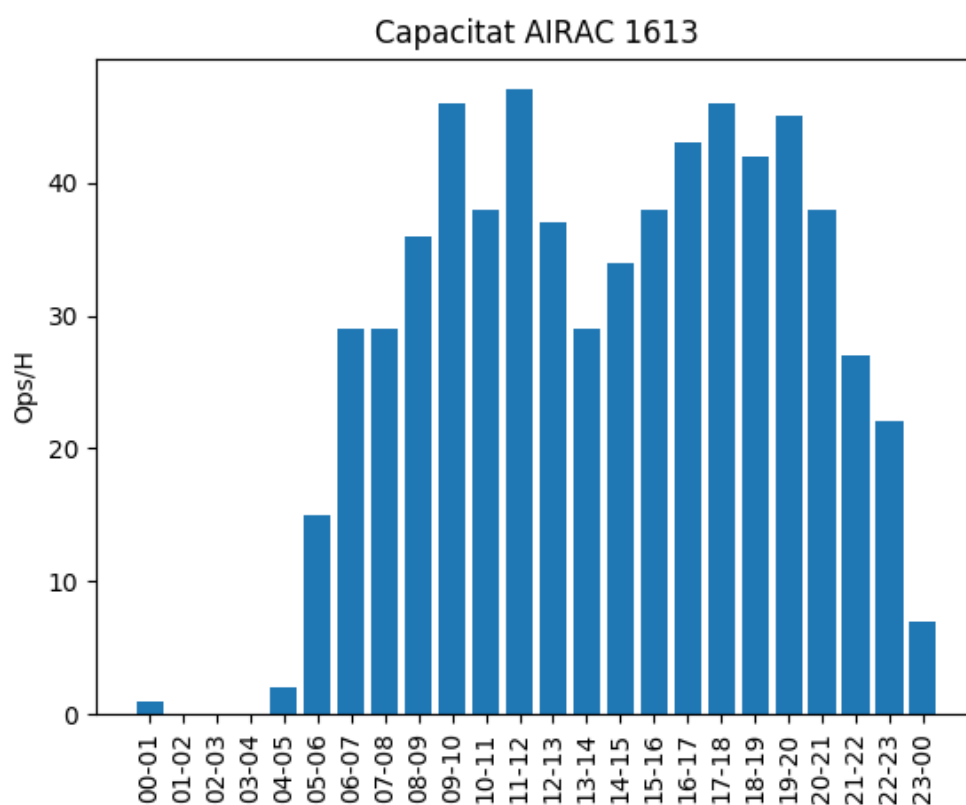
**Fig 4.2** Número de sortides de mitjana en el cicle AIRAC 1703



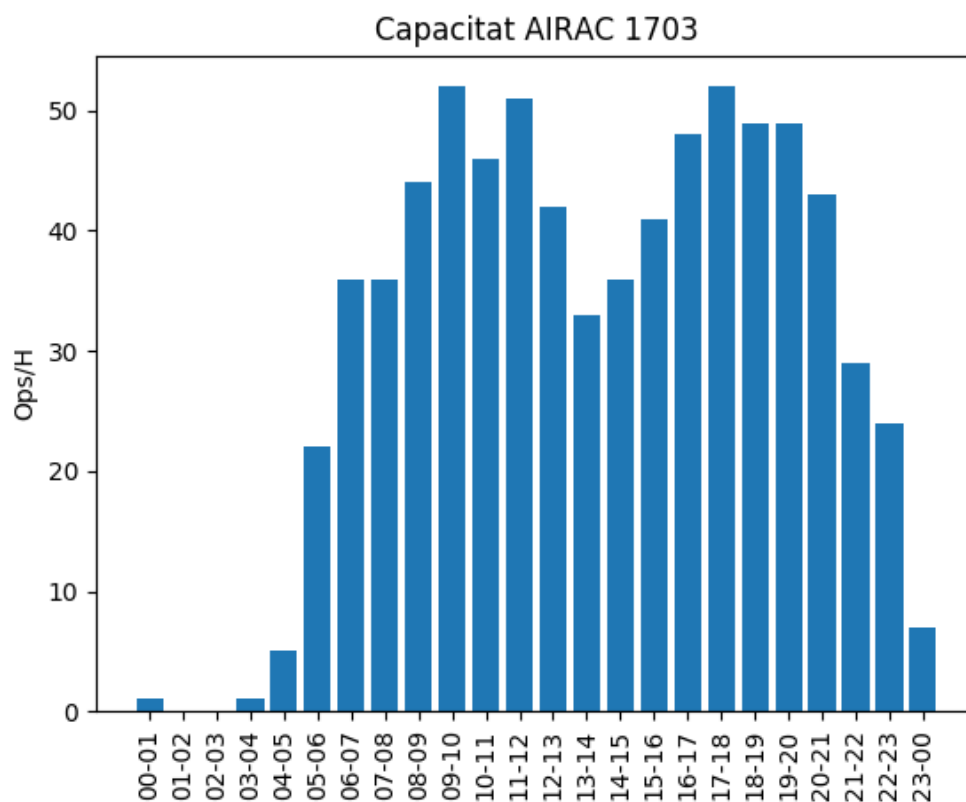
**Fig 4.3** Número d'arribades de mitjana en el cicle AIRAC 1613



**Fig 4.4** Número d'arribades de mitjana en el cicle ARIAC 1703



**Fig 4.5** Número d'operacions/hora en el cicle AIRAC 1613



**Fig 4.6** Número d'operacions/hora en el cicle AIRAC 1703

En les figures anteriors es pot observar com el comportament entre els dos cicles AIRAC són similars cos es pot apreciar en les últimes dues figures, que mostren la operativa total de l'aeroport de Barcelona. On hi ha dos períodes de temps, un pel matí entre les 09:00 i les 12:00, i l'altre per la tarda entre les 16:00 i les 20:00, on durant aquestes 7 hores es quan hi ha un major us de les instal·lacions i infraestructures de l'aeroport.

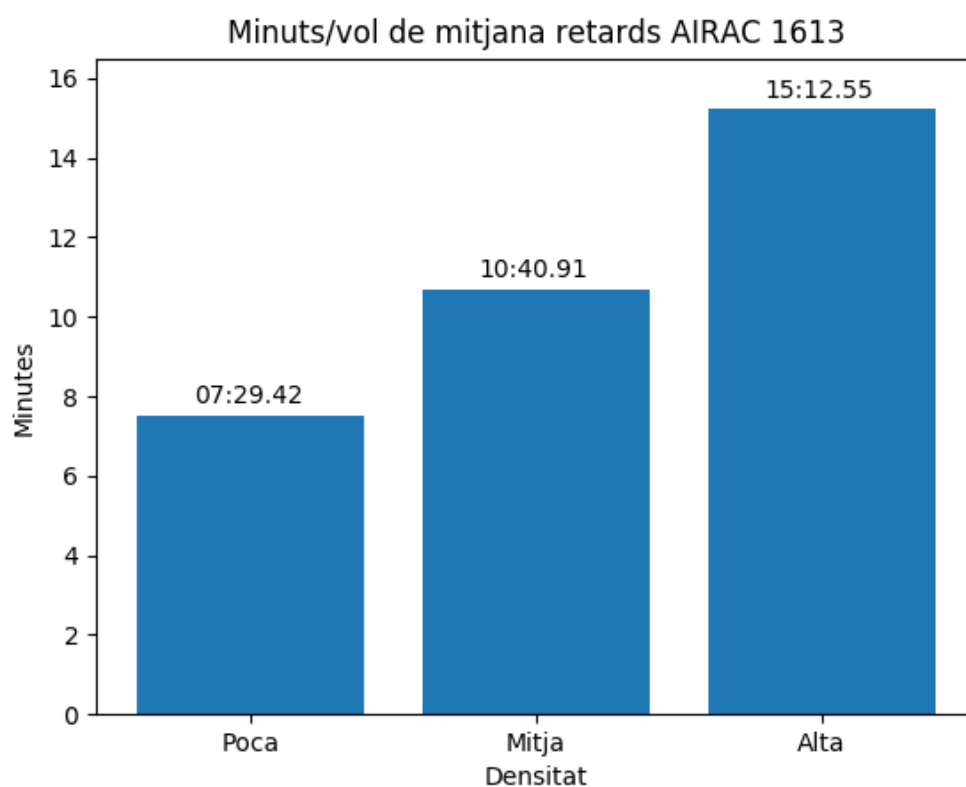
En les figures 4.1 i 4.2 s'observa que en els dos cicles AIRAC el pics de sortides corresponen a les tres mateixes franges horàries. Són entre les 06:00 i les 07:00, les 11:00 i les 12:00 i entre les 17:00 i les 18:00. El període entre les 11 i les 12 es degut a que és quan l'aeroport té el major nombre d'operacions com s'observa en les figures 4.5 i 4.6. Però, les altres dues franges corresponen en els horaris en que els executius solen viatjar. A més, si ens fixem amb les imatges 4.3 i 4.4 observem que els pics es produeixen en les franges horàries que venen després, entre les 07:00 i les 10:00, entre les 18:00 i les 20:00. Que marquen l'horari de tornada dels executius i gent que utilitza l'aviació per qüestions de feina diàriament.

Observant les figures que mostren la mitjana d'operacions es pot analitzar que una gran part de l'operativa de l'aeroport es realitza en condicions d'una densitat mitjana i els que estan per sobre 48 són pocs i no s'atansen a les 72 operacions per hora que poden realitzar. Permet deduir que en termes de capacitat, almenys operativa avions, pel que fa referència a les Terminals no es pot dir, l'aeroport de Barcelona tenint en compte només la capacitat, és apta per assolir un nombre superior de vols que els que té actualment i podria assolir l'augment d'operacions que el projecte SESAR busca, sobretot si explota totes les franges horàries disponibles.

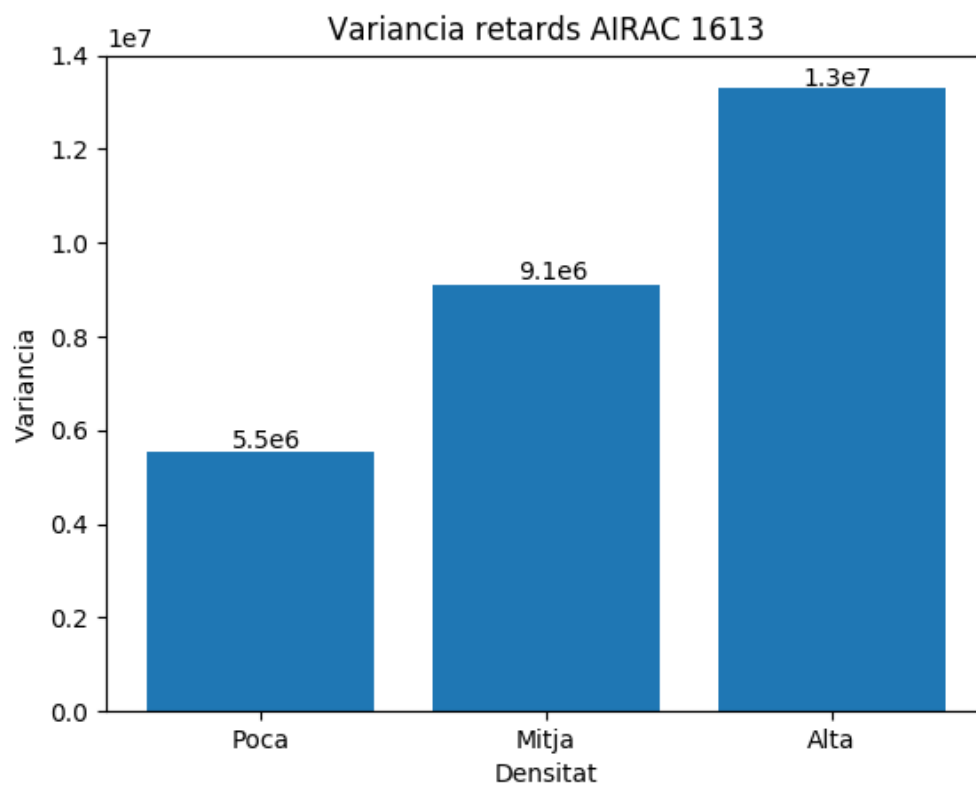
## 4.2. Puntualitat

Una de les hipòtesis era comprovar que ha major capacitat, nombre d'operacions per hora, la puntualitat es veia afectada negativament. És pot comprovar en les figures 4.11 i 4.12, les quals representen la puntualitat amb la Cota15 com a KPI, que la puntualitat pels dos cicles AIRAC com efectivament en termes generals es veu molt afectada amb l'increment de la operativitat. S'observa que amb un increment de 3 vegades de la capacitat la puntualitat és veu reduïda aproximadament un 11 %. Considerant una progressió lineal, en un hipotètic increment del doble de les operacions hora, la puntualitat seria aproximadament d'un 70 - 75 %. En aquest apartat es veuria més afectada però encara es mouria en valors operables i acceptables. Però, amb aquest increment la reducció del 30 % en els retards no es veuria reflectit i no es compliria aquest objectiu del projecte SESAR.

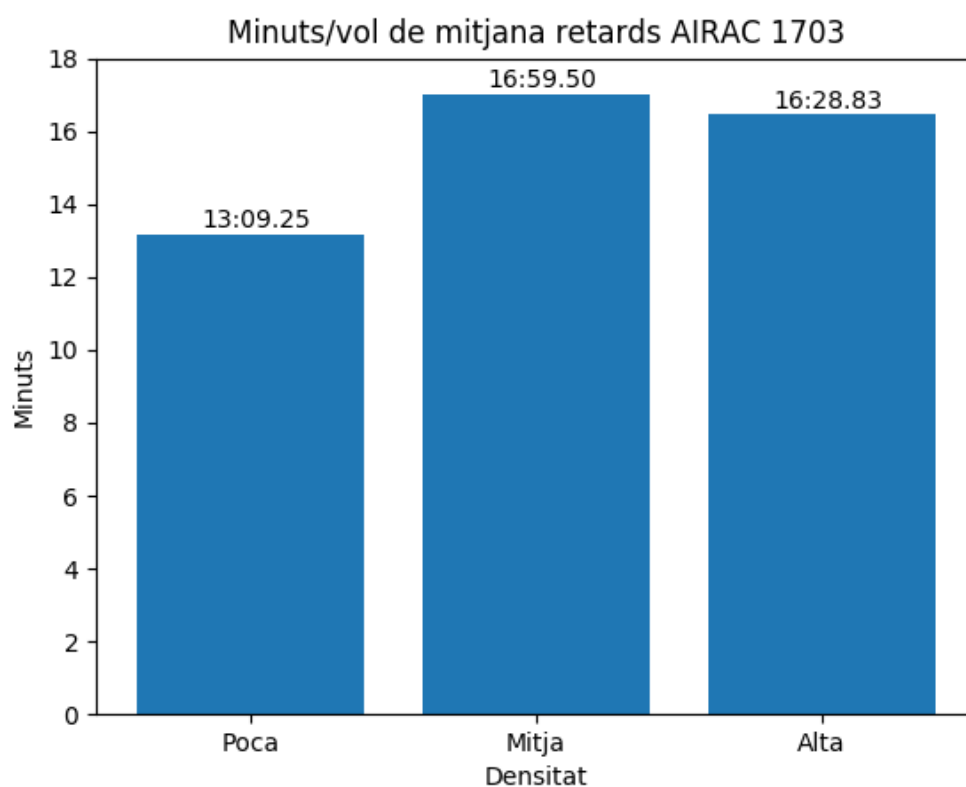
Observant la capacitat i la puntualitat es veu que gran part del augment de les operacions que haurà d'assolir en un futur l'aeroport de Barcelona, haurien de passar per incrementar de les operacions en les franges horàries menys operades per mantenir uns índex de puntualitat el més alts possibles.



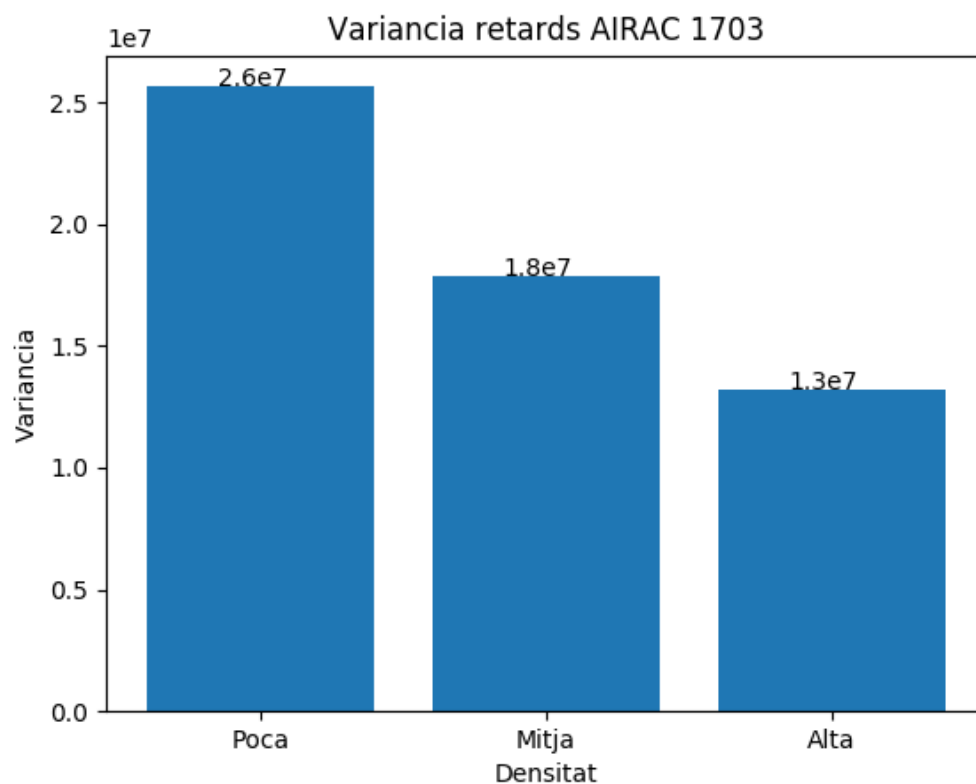
**Fig 4.7** Retards de mitjana cicle AIRAC 1613



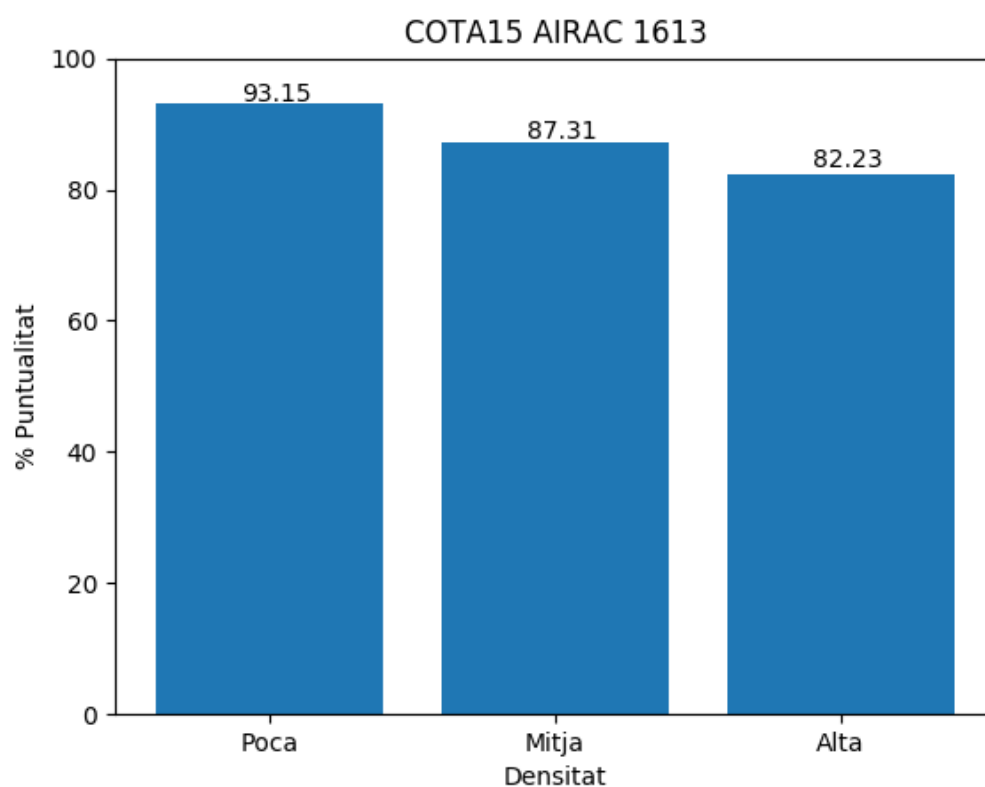
**Fig 4.8** Variància en els retards cicle AIRAC 1613



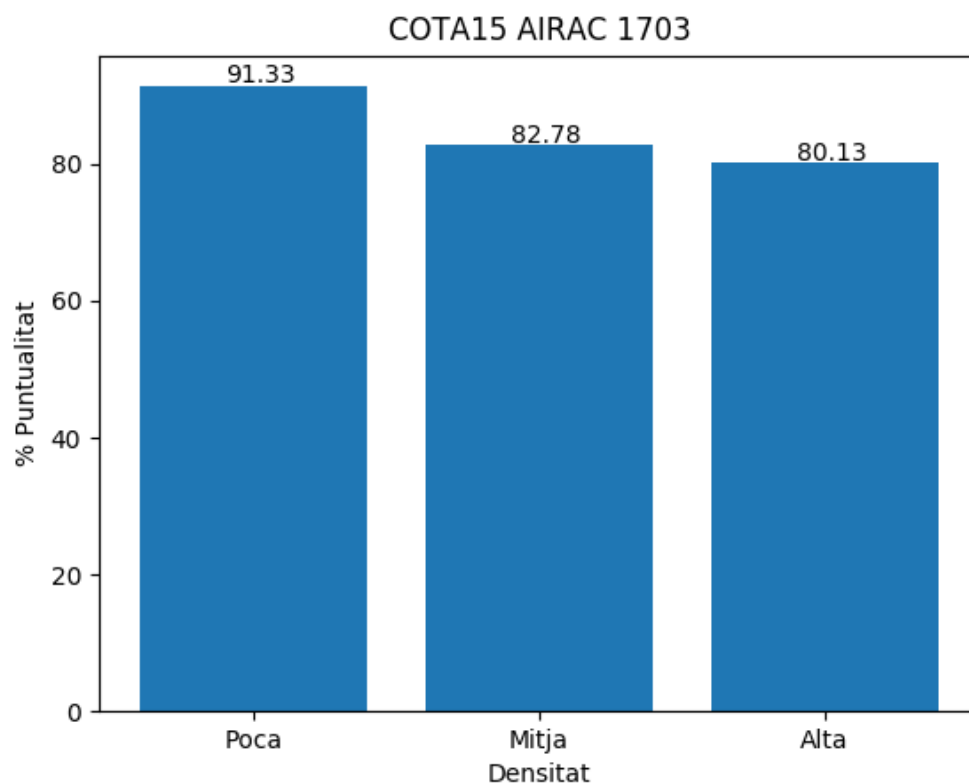
**Fig 4.9** Retards de mitjana cicle AIRAC 1703



**Fig 4.10** Variància en els retards cicle AIRAC 1703



**Fig 4.11** Puntualitat segons Cota15 cicle AIRAC 1613



**Fig 4.12** Puntualitat segons Cota15 cicle AIRAC 1703

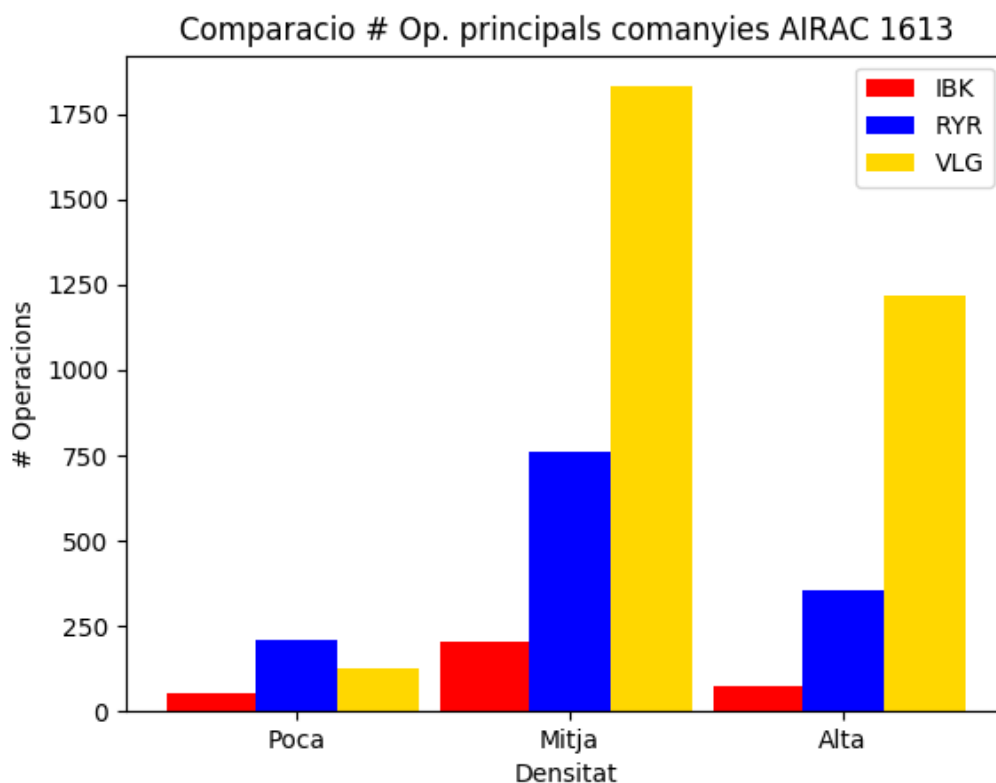
En canvi si s'observa la mitjà de retards per vol, s'observa en els dos cicles AIRAC una gran diferencia, sobretot en el de baixa densitat. Analitzant les gràfiques en baixa densitat es percep que pràcticament amb el mateix índex de puntualitat, el retard mitjà i la variància en l'escenari de baixa capacitat és pràcticament el doble, i un factor 4 en la variància. Aquesta última ens indica una gran disparitat entre valors. Observant l'arxiu de Cota15 que es va obtenir d'aquest cicle AIRAC s'observa que el dia 04 de Març de 2017 és van produir molt més retards i de valors molt elevats, que són els responsables d'aquesta variació.

S'observa que aquest últim KPI és més òptim per un dia en concret que es vulgui observar. Però no aporta informació en una gran densitat de vols a observar.

### 4.3. Equitat

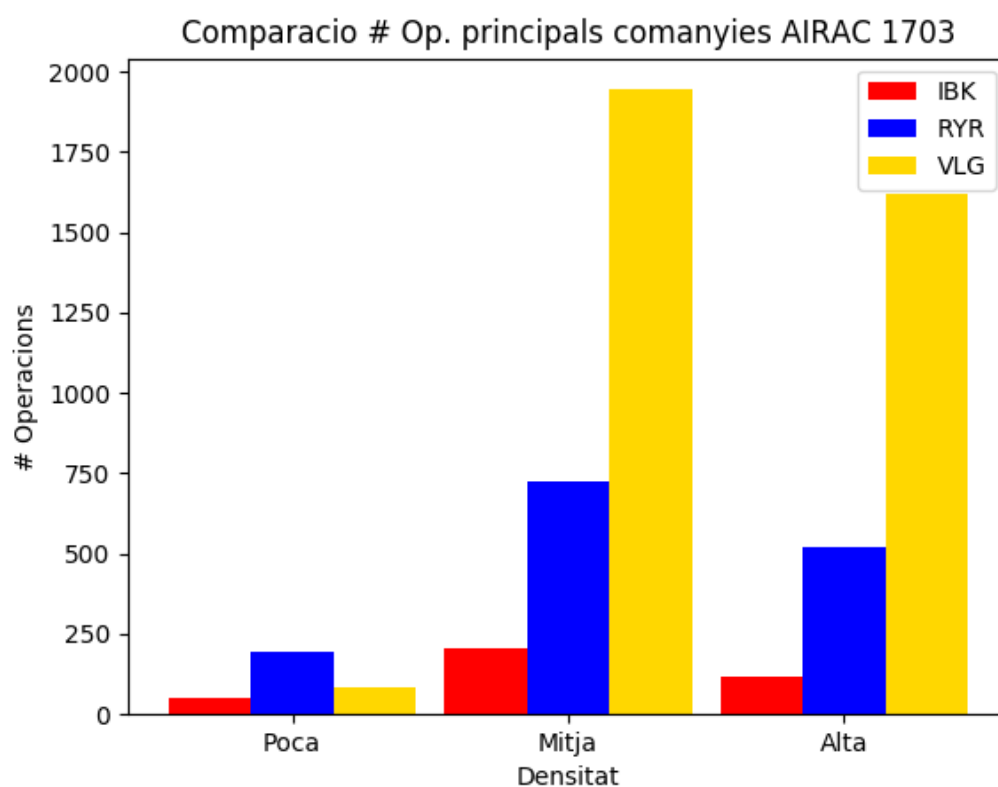
Utilitzant el KPI de puntualitat es pot observar les principals companyies que operen a l'aeroport de Barcelona, les quals són low-cost les tres (Vueling, Ryanair i Norwegian), per tant, assumint que les tres operen d'una forma similar es poden comparar.

En les dues següents figures s'observa que la companyia que més opera en l'aeroport de Barcelona és Vueling, la qual es lògic perquè es la companyia que té el seu principal *hub* en aquest aeroport. No obstant, es curiós i s'aprecia com Ryanair és la que més opera durant els períodes de baixa densitat.

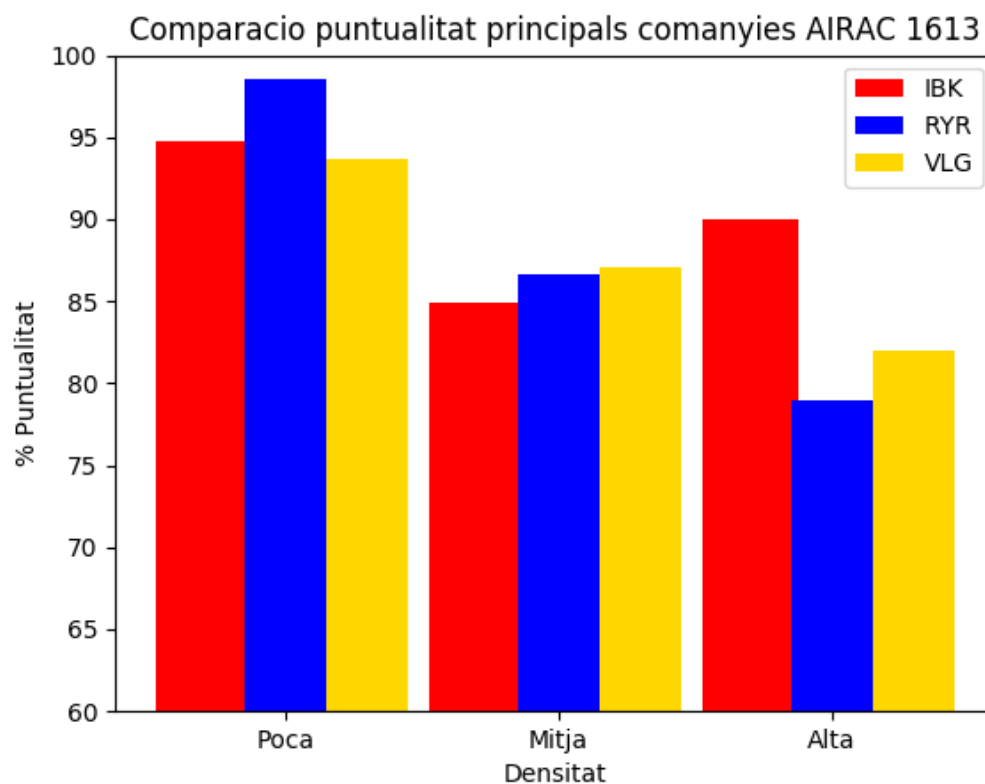


**Fig 4.13** Número d'operacions per companyia cicle AIRAC 1613

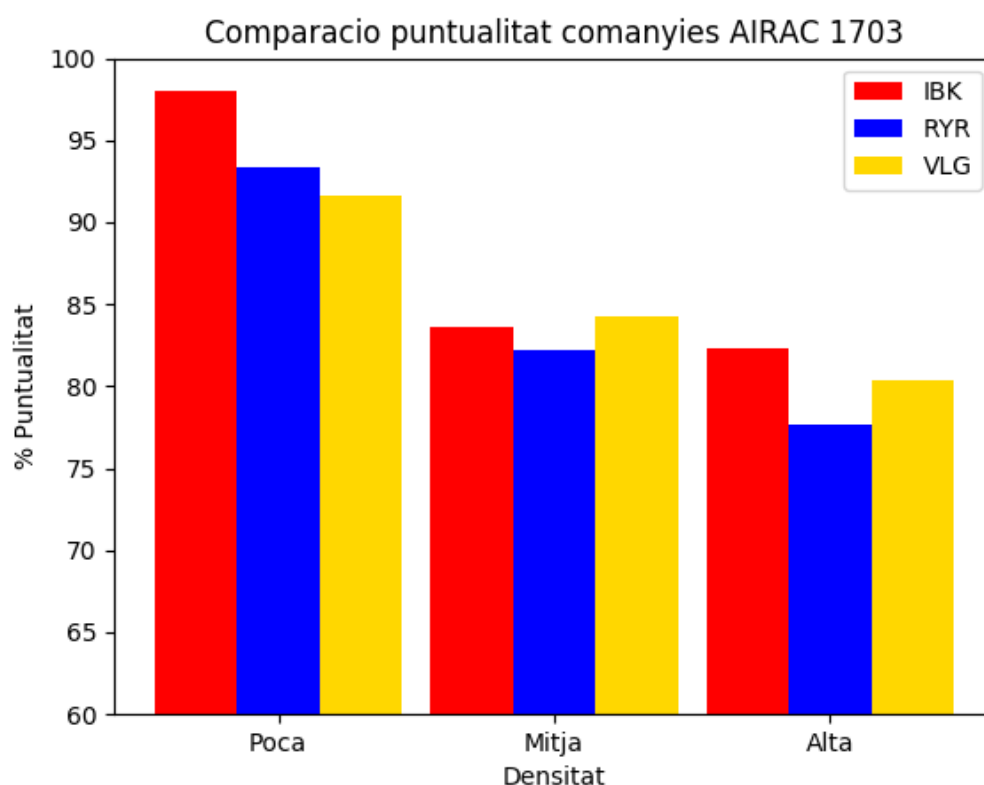




**Fig 4.14** Número d'operacions per companyia cycle AIRAC 1703



**Fig 4.15** Puntualitat per companyia cycle AIRAC 1613



**Fig 4.16** Puntualitat per companyia cicle AIRAC 1703

Analitzant la comparació de puntualitat, s'observa que en termes generals la companyia Noruega es la més puntual. Exceptuant la d'alta densitat de Norwegian del cicle AIRAC 1613, la tendència és similar en totes i s'observa que en general es tracta igual a les tres principals companyies que operen a Barcelona. Com que són les companyies que més operen i representen un gran percentatge de les operacions que es realitzen a l'aeroport de Barcelona - El Prat, es percep que la puntualitat d'aquestes correspon a la puntualitat de l'aeroport de Barcelona com s'observa a les figures 4.11 i 4.12.

Es pot extreure que Ryanair aprofita les hores de menys operativitat per operar més que els altres i obtenir valors de puntualitat alts, ja que quan augmenta la capacitat perd puntualitat respecte els seus competidors.

Es pot confirmar la hipòtesis d'aquesta àrea que ha major volum la equitat entre les companyies es manté similar i no es prioritza a cap companyia per sobre de les demés.

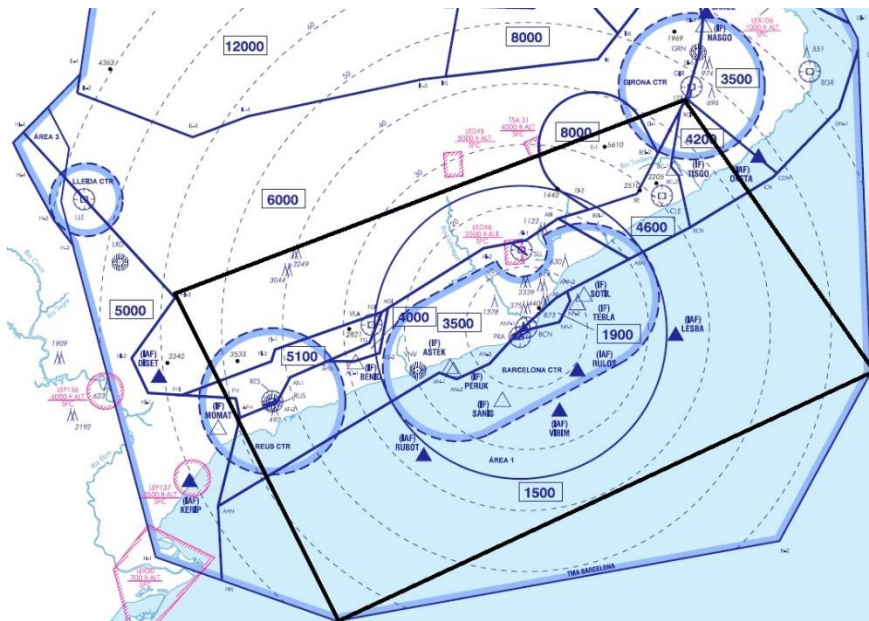
#### 4.4. Eficiència operacional

En aquesta secció s'analitzen els resultats obtinguts al mesurar l'eficiència operacional, lateral i vertical.

El que s'ha fet es mesurar quan de temps i la distancia recorreguda de mitjà per vol dins del sector de limitat pels següents quatre punts i que es pot observar a la figura 4.17. Mesurar el nombre de *levels-off* per vol que s'han produït dins del sector. Considerant un canvi de 100 ft en l'altitud com 1 variació.

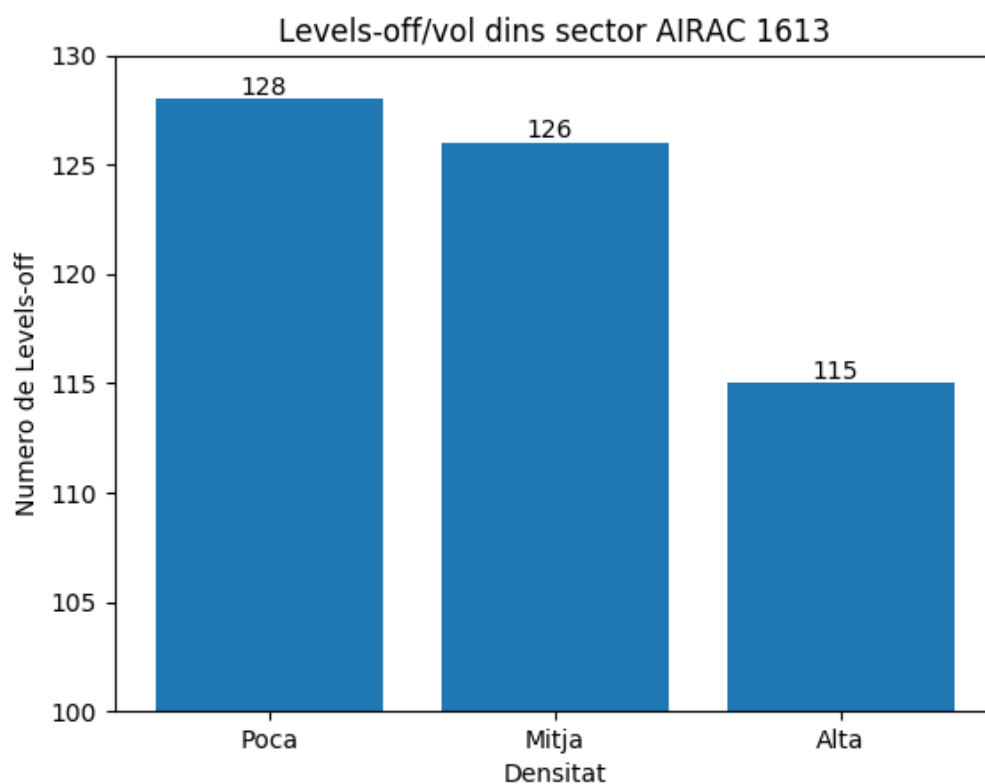
Punts:

1. 41°54'03"N 002°44'56"E
2. 41°26'52"N 000°50'24"E
3. 40°32'22"N 001°21'23"E
4. 41°06'45"N 003°20'26"E

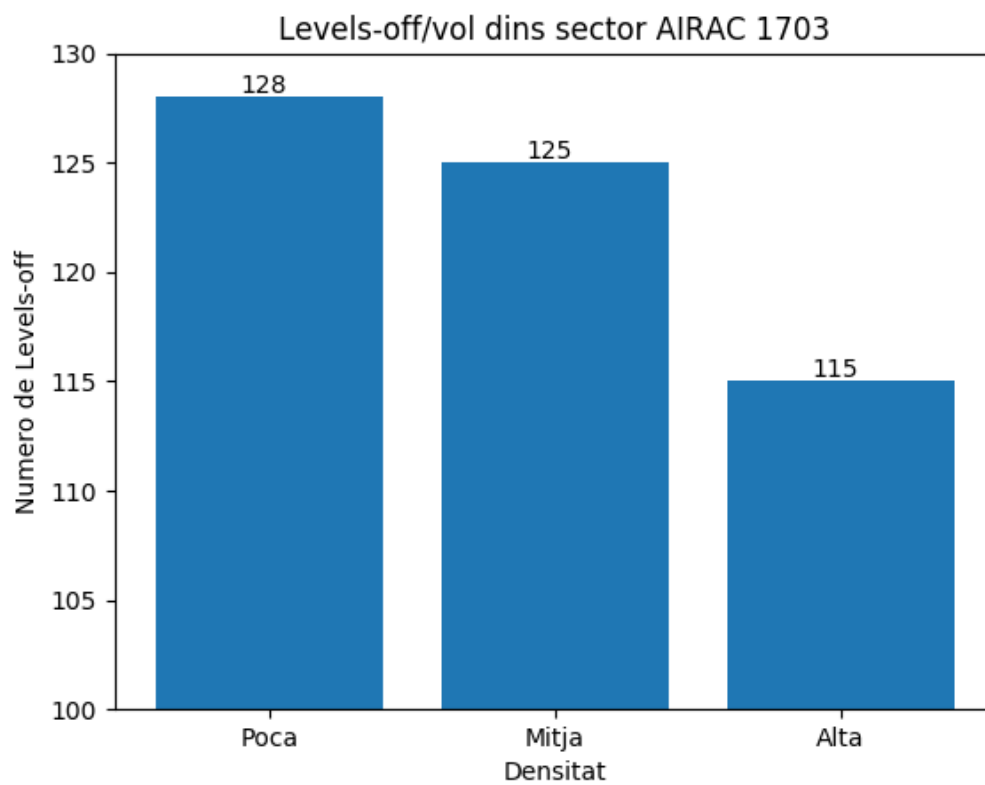


**Fig 4.17** Àrea d'estudi seleccionada per mesurar l'eficiència

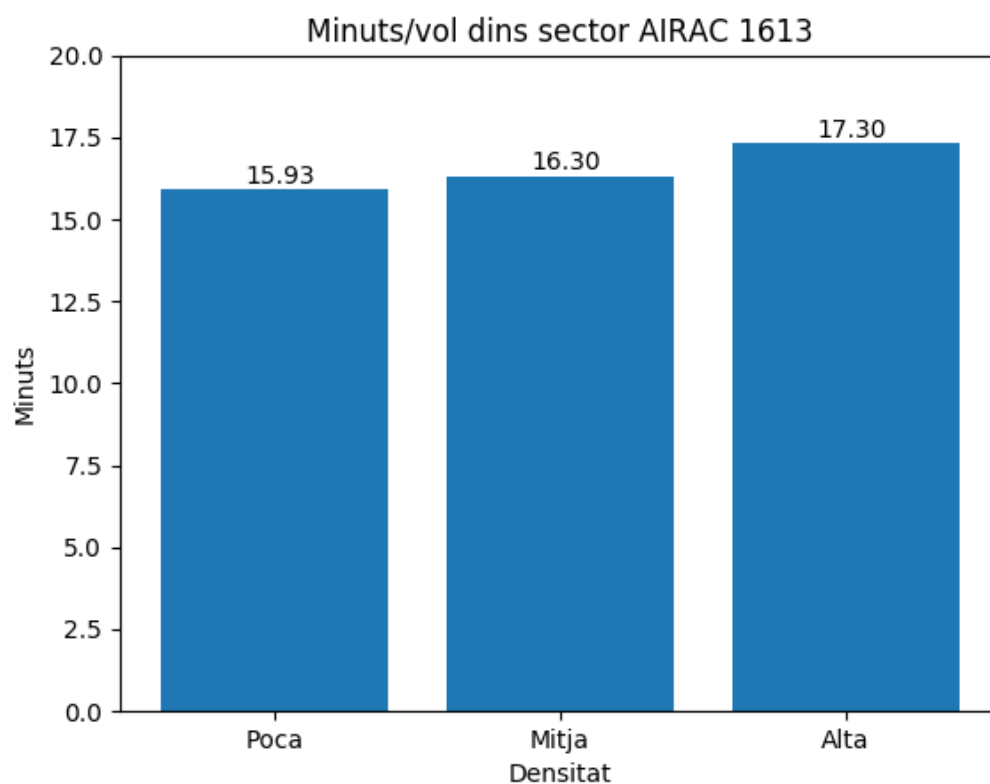
En les següents figures 4.18 i 4.19 es mostra com el nombre de *levels-off* és pràcticament igual en els dos cicles AIRAC i no hi ha una gran variació entre els diferents escenaris. A més, s'observa que a major densitat hi ha menor canvis de vol observant una petita millora en l'eficiència vertical. Per tant, desmenteix la hipòtesis generada per aquesta àrea. A més indica que l'espai aeri de l'aeroport de Barcelona està capacitat per augmentar la capacitat, ja que la eficiència vertical no es veu afectada, sinó contràriament es veu lleugerament millorada.



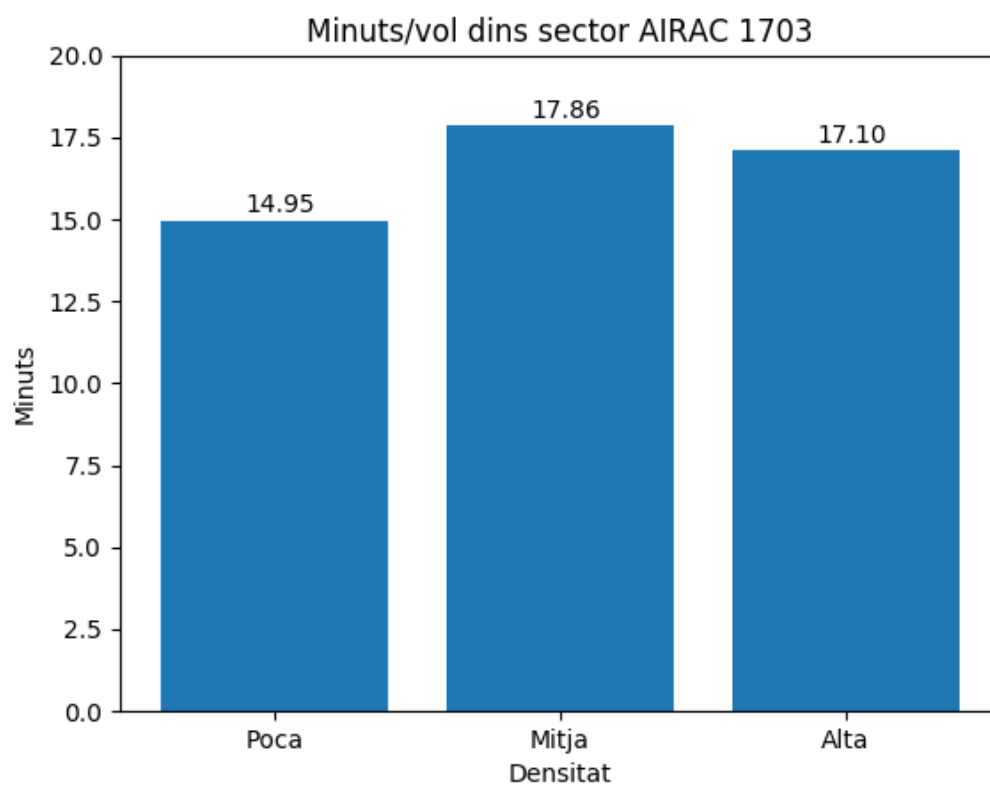
**Fig 4.18** Levels-off per vol cicle AIRAC 1603



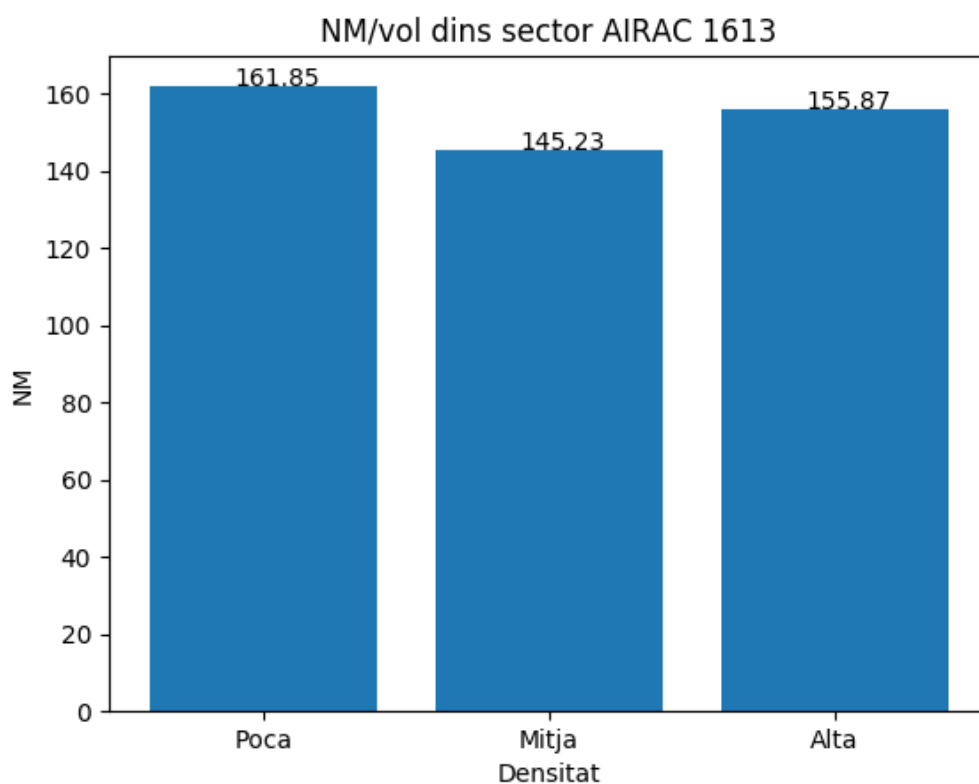
**Fig 4.19** Levels-off per vol cicle AIRAC 1703



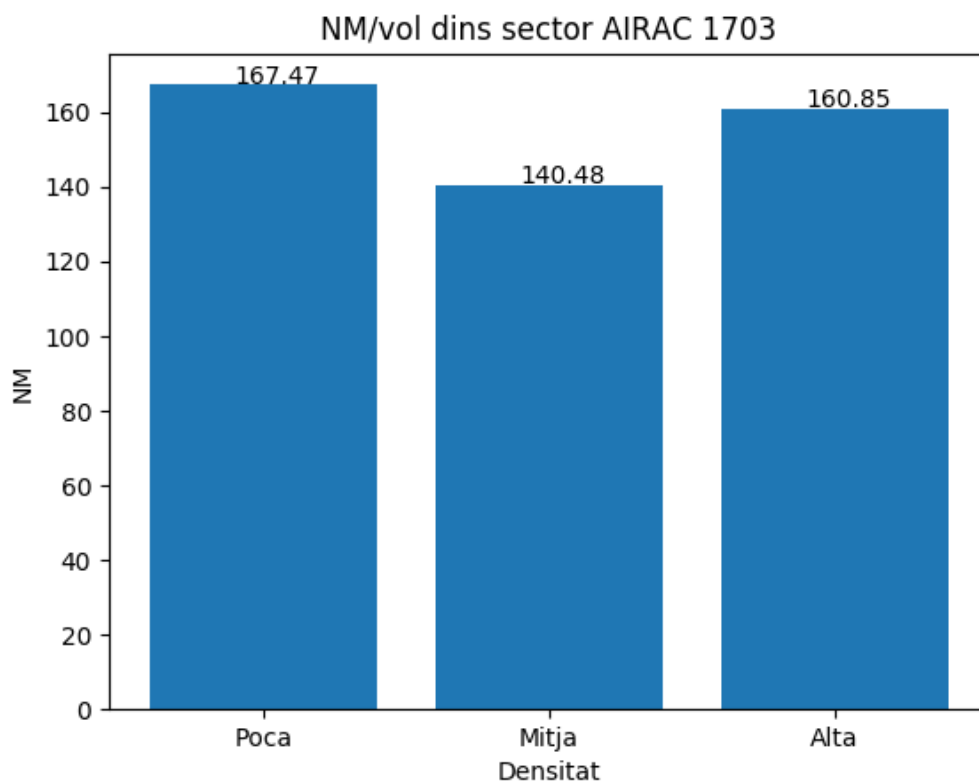
**Fig 4.20** Minuts per vol cicle AIRAC 1613



**Fig 4.21** Minuts per vol cicle AIRAC 1703



**Fig 4.22** Milles nàutiques per vol cicle AIRAC 1613



**Fig 4.23** Milles nàutiques per vol cicle AIRAC 1703

En les gràfiques anteriors s'extreu que durant el període que l'aeroport de Barcelona està en baixa operativitat hi ha una major aflluència d'avions en creuer, almenys una relació entre avions que creuen el sector i avions que operen a Barcelona major que amb els dos altres escenaris, degut a que amb menor temps dins el sector es realitza major distància, implicant una velocitat superior, que s'obté quan hi ha més avions que van a velocitat de creuer i no surtin o aterrant a l'aeroport.

En canvi amb els altres dos escenaris, amb temps similars i assumint, ja que amb certesa no ho podem saber, condicions similars de relació entre creuer i operacions aeroport, s'observa que a alta densitat de transit es recorre més trajecte. degut a major ineficiències i teòricament major esperes que es realitzen a més altes velocitats, per això l'augment de la distància recorreguda.

S'interpreta que ha major densitat, l'eficiència lateral si que es veu una mica més afectada corroborant la hipòtesis inicial, però l'increment no excessivament alt. Fet que implica l'eficiència no és l'àrea més restrictiva en un hipotètic increment de la capacitat.

Observant, s'hauria tingut que limita l'estudi a avions que operessin només a l'aeroport per obtenir resultats no tant ambigus.

## 4.5. Seguretat

En aquesta secció s'analitza els resultats obtinguts per la KPA de la seguretat, on la KPI corresponent és el nombre de pèrdues de separació que es produeixen en els diferents escenaris.

En una primera simulació d'un període de temps molt curt es van observar un gran nombre de pèrdues de separació en les proximitats de l'aeroport aplicant les restriccions mencionades anteriorment en el Capítol 2. Analitzant l'arxiu obtingut es va poder interpretar que en les proximitats es vola molt més amb visual del que teòricament s'esperava. Per poder obtenir valors més reals i no alterats per aquest gran nombre d'incerteses s'ha optat per analitzar l'espai aeri superior a 4000 ft, és on comencen la gran majoria d'aproximacions IAC.

A més a més en aquesta secció, degut al gran nombre de dades a processar i comparar, i el llarg temps de processat que requereix aquesta KPI, s'ha optat per realitzar l'estudi només en un cicle AIRAC. S'ha optat pel cicle AIRAC 1703 perquè durant aquest període de temps s'han realitzat un major nombre d'operacions que en el 1613.

En les figures 4.24 i 4.25 s'observen els resultats obtinguts al aplicar el programa per analitzar la seguretat de l'espai aeri del sector triat, el qual es pot observar en la figura anterior 4.17.

El primer que impacta és el gran nombre de conflictes que s'han trobat durant aquest període de temps. Evidentment en l'aeroport de Barcelona no es

produeixen tantes pèrdues de separació com les obtingudes en aquest projecte, ja que implicaria un caos molt gran en la TMA del Prat.

Observant els fitxers extrets del programa s'observen molts conflictes amb variacions d'altitud que son inferiors als 1000 ft o 2000 ft quan es per sobre FL410 però molt pròxims aquest valors. Aquest gran nombre podrien venir produïts per un possible error en l'emissió de dades, però sobretot pel no coneixement exacte en un instant determinat i tenir que interpolar valors, tant GNSS com alhora de comparar. Aquestes interpolacions que donen valors aproximats poden fer que es comptabilitzin pèrdues en moments que realment no es donen.

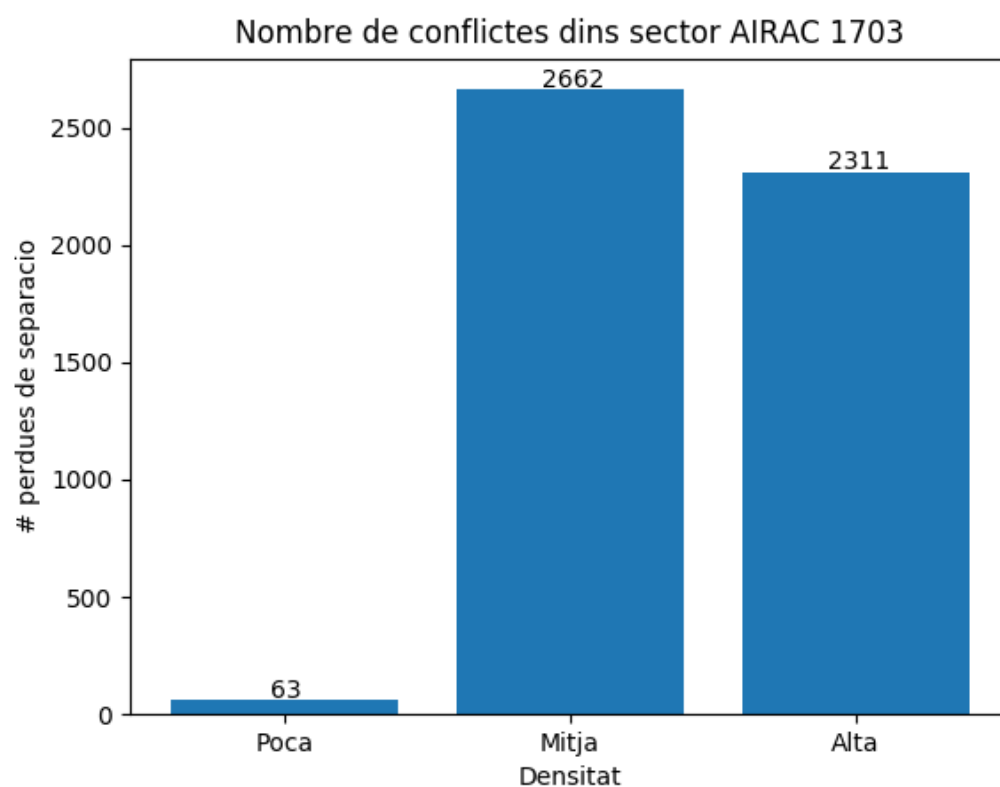
No obstant, com que s'ha realitzat en les mateixes condicions si que permet comparar els resultats entre els diferents escenaris. Sobretot el de la figura 2.25, ja que normalitza els resultats amb el nombre total d'operacions que s'han realitzat durant aquest període de temps.

Analitzant l'última imatge d'aquest capítol s'observa que a mesura que augmenta la capacitat, és a dir, la congestió de l'espai aeri, el nombre d'avions que es veuen afectats per una possible pèrdua de separació augmenta; confirmant la hipòtesis inicial d'aquesta àrea.

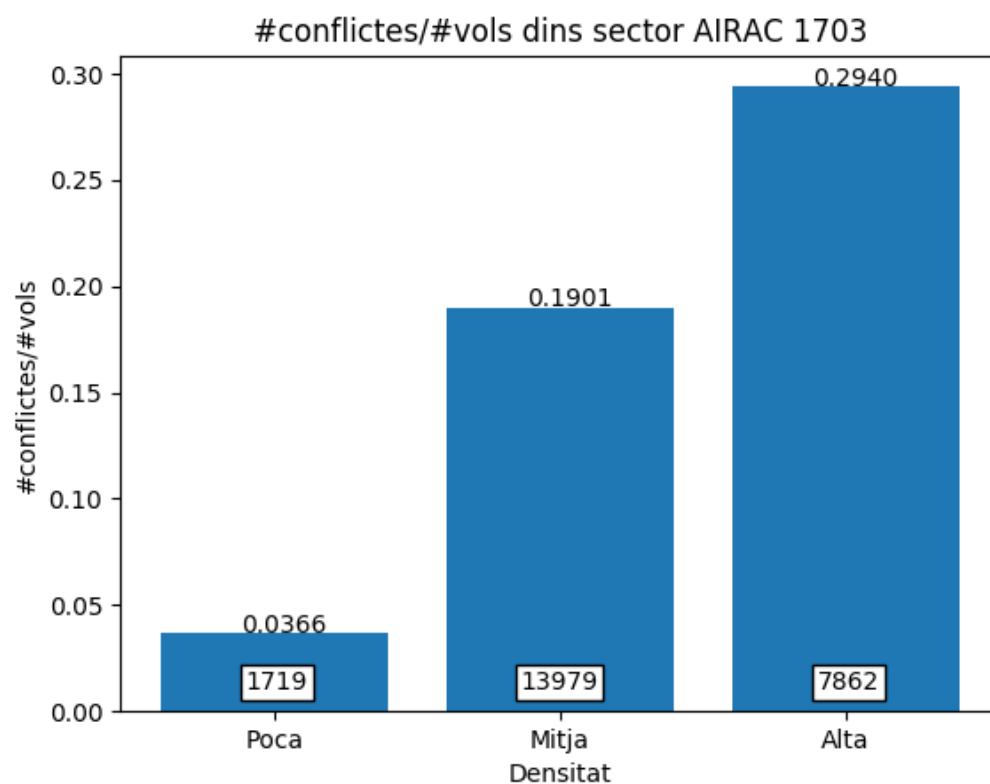
A més a més, es percep que l'increment entre operativa de baixa densitat i la de mitjà, el nombre de conflictes s'incrementa en un factor 5 i que el increment amb la de alta densitat és d'un 50 % més que la de mitjà. Que permet intuir que en cas d'un augment del doble de la capacitat seria realment un factor molt preocupant, sobretot si l'objectiu es reduir en un factor 4 el nombre de conflictes.

També es pot extreure que en aquest moment i en el futur pròxim, SESAR i els diferents organismes que volen assolir els objectius marcats per fer front al increment de la demanda hauran de centrar esforços i estudis en aquesta àrea com a principal coll d'ampolla pel creixement i gestió del transit aeri.





**Fig 4.24** Número de conflictes durant cicle AIRAC 1703



**Fig 4.25** Número de conflictes entre número de vols analitzats durant el cicle AIRAC 1703



## CONCLUSIONS

Una vegada finalitzat el projecte i analitzats els resultats obtinguts aplicant la metodologia i estudis dels diferents àrees, es poden extreure les conclusions següents sobre els diferents actors i indicadors utilitzats.

- En primer lloc, en relació a l'àrea de la capacitat és pot dir que la planificació d'arribades i sortides de l'aeroport de Barcelona - El Prat és molt bona, ja que no sobre explota cap franja horària en general, el que li permet tenir un marge de maniobra i de creixement amb les configuracions de pistes que té actualment molt gran. Aquest marge permetrà assolir els objectius marcats per SESAR en aquesta àrea. També s'extreu que el període de temps compres entre les onze de la nit i les 6 del matí, l'aeroport està pràcticament inactiu, el qual té un possible creixement molt gran.
- Respecte a la puntualitat un dels punts que s'extreu es que l'indicador de retard mig juntament amb la variància no era el millor indicador per observar el que es buscava en aquest projecte. Perquè no aporta informació amb un gran nombre de vols analitzats.

En canvi, el indicador de puntualitat Cota15 sí que aportat informació pel que es volia analitzar. S'extreu i es confirma la hipòtesis plantejada de que a major nombre d'operacions a l'aeroport de Barcelona, la puntualitat de les companyies es veu degradada. A més, la tendència dels tres escenaris marca que en un futur hipotètic en que augmentes la capacita en un factor 2 la puntualitat es veuria reduïda entre un 5 - 10 % més del que ja ho està. Implicant que no s'aconseguiria l'objectiu de SESAR de reduir en un 30 % els retards. Per tant, SESAR haurà d'estudiar com es pot millorar el rendiment en les instal·lacions aeroportuàries per poder assolir el seu objectiu.

- Seguint amb l'equitat, s'arriba a la conclusió que en els diferents escenaris les principals companyies que operen a Barcelona són tractades de forma similar sense prioritzar-ne cap. Per tant, confirma la hipòtesis que la capacitat no havia d'afectar per diferent les companyies que operessin a Barcelona. A més, permet assumir que en el futur amb un increment de la demanda seguirà actuant igual i no serà un impediment pel progres de l'aviació a la ciutat de Barcelona.

També s'extreu que el indicador de puntualitat utilitzat per comparar el comportament de l'aeroport de Barcelona respecte les companyies serveix per comparar la KPA de l'equitat.

- Continuant amb l'eficiència operacional, en primer lloc s'extreu que els indicadors utilitzats són bons quantificadors de l'eficiència, però que segurament es podria treure més profit si l'input d'informació hagués estat

més limitat, per exemple analitzar només els vols que surten de Barcelona.

No obstant, també s'ha pogut extreure, contràriament al que es pensava i es plantejava, que ha major capacitat l'eficiència vertical es veia afectada negativament. S'ha observat que els valors eren molt similars però lleugerament millors quan augmentava la capacitat.

Per altra banda, si que s'ha confirmat que l'eficiència lateral es veu afectada negativament quan la capacitat augmenta. Fet que apunta a possibles majors esperes i que els controladors aeris responsables de l'espai aeri de Barcelona varien més la direcció que l'altitud per resoldre conflictes.

Finalment, s'ha observat que l'eficiència operacional no es l'àrea més limitant i té una afectació menor que les altres quan s'augmenta la capacitat. Per tant, SESAR hauria d'estudiar més altres àrees que tinguin un impacte més gran en la gestió del transit aeri.

- Per acabar, en l'àrea de seguretat s'ha confirmat la hipòtesis inicial que al augmentar la capacitat la seguretat, el nombre de conflictes augmenta. Tenint en compte que un dels objectius de SESAR és reduir en un factor 4 el nombre d'incidents i accident mentre la capacitat augmenta el doble, haurà de posar recursos i projectes per intentar solucionar aquest problema, perquè segurament és el coll d'ampolla de la gestió i control de l'aviació.

Tot i que no s'ha mencionat durant el report, per realitzar l'anàlisi de les dades s'ha utilitzat Python i les llibreries científiques de les quals disposa [16][17][18]. El qual ha permès aprendre un nou llenguatge i la seva gran utilitat per analitzar un gran nombre de dades.

## BIBLIOGRAFIA

- [1] De Juniac, Alexandre. Anual review 2017 [en línia]. Cancun: IATA, International Air Transport Association, 2017 [Última consulta: Octubre 2017]. Disponible a: <<http://www.iata.org/publications/Documents/iata-annual-review-2017.pdf>>.
- [2] Aena. Estadísticas de tráfico aéreo. [en línia]. Aena, 2017. [Última consulta: Agost 2017]. Disponible a: <<http://www.aena.es/csee/Satellite/?pagename=Estadistica/Home>>.
- [3] European Union i Eurocontrol, European ATM Mater Plan, Edition 2015.
- [4] Laurent Tabernier, Presentation SESAR Key Performance AREA, Performance targets and assessment, Bretigny 13 Maig.
- [5] Tom G. Reynolds, Development of Flight Inefficiency Metrics for Environmental Performance Assessment of ATM, Institute for Aviation and the Environment, University of Cambridge, Cambridge, Regne Unit.
- [6] Sangaku Maths. Estadística, Variància i desviació típica [en línia]. Sangaku, 2017 [Última consulta: Octubre 2017]. Disponible a: <<http://www.sangakoo.com/ca/temes/variancia-i-desviacio-tipica>>.
- [7] S.D. Thompson, "Current Seaportion Requirements", Cap. 4 en *Terminal Area Separation Standards: Historical Development, Current Standards, and Processes for Change*, pp. 19-26, Lincoln Laboratory, Massachusetts Institute of Technology, Lexington, Massachusetts 16 Gener 1997.
- [8] SKYbrary. Separation Standards [en línia]. SKYbrary, 2016 [Última consulta: Octubre 2017]. Disponible a: <[https://www.skybrary.aero/index.php/Separation\\_Standards](https://www.skybrary.aero/index.php/Separation_Standards)>.
- [9] SKYbrary. Reduced Vertical Separation Minima (RVSM) [en línia]. SKYbrary, 2015 [Última consulta: Octubre 2017]. Disponible a: <[https://www.skybrary.aero/index.php/Reduced\\_Vertical\\_Separation\\_Minima\\_\(RVSM\)](https://www.skybrary.aero/index.php/Reduced_Vertical_Separation_Minima_(RVSM))>.
- [10] G De Clercq, "Criteria for Accuracy of a Radar System/Sensor to suport 3NM or 2.5NM", Cap. 6 en *Guidelines for the Application of the ECAC Radar Separation Minima*, pp. 13-16, 2 edició, 14 Desembre 1998.
- [11] SKYbrary. Wake Vortex Turbulence [en línia]. SKYbrary, 2017 [Última consulta: Octubre 2017]. Disponible a: <[https://www.skybrary.aero/index.php/Wake\\_Vortex\\_Turbulence](https://www.skybrary.aero/index.php/Wake_Vortex_Turbulence)>.

[12] José Guerrero, Distancia entre dos puntos de la superficie terrestre mediante la fórmula de Haversine con Python [en línia]. El blog de José Guerrero, 2017 [Última consulta: Octubre 2017]. Disponible a: <<https://joseguerreroa.wordpress.com/2012/11/13/distancia-entre-dos-puntos-de-la-superficie-terrestre-mediante-la-formula-de-haversine-con-python/>>

[13] SKYbrary. Automatic Dependent Surveillance Broadcast (ADS-B) [en línia]. SKYbrary, 2017 [Última consulta: Octubre 2017]. Disponible a: <[https://www.skybrary.aero/index.php/Automatic\\_Dependence\\_Surveillance\\_Broadcast\\_\(ADS-B\)](https://www.skybrary.aero/index.php/Automatic_Dependence_Surveillance_Broadcast_(ADS-B))>.

[14] R.D. Grappel i R.T. Wiken, Guidance Material for Mode S-Specific Protocol Application Avionics, Lincoln Laboratory, Massachusetts Institute of Technology, Lexington, Massachusetts 4 Juny 2007.

[15] “Interpolación”, secció 12 en “Desarrollo del programa”, Cap. 3 en *Integración de máquinas medidoras por coordenadas en entornos CAD/CAM*, pp. 109-117. Disponible a: <[http://repositorio.upct.es/bitstream/handle/10317/146/12\\_Interpolacion.pdf;jsessionid=00316681FB81AC928DE5697047233A14?sequence=15](http://repositorio.upct.es/bitstream/handle/10317/146/12_Interpolacion.pdf;jsessionid=00316681FB81AC928DE5697047233A14?sequence=15)>.

[16] Numpy. Fundamental package for scientific computin with Python [en línia]. Numpy, 2017 [Última consulta: Octubre 2017]. Disponible a: <<http://www.numpy.org/>>.

[17] Pandas. Python Data Analysis Library [en línia]. Pandas, 2017 [Última consulta: Octubre 2017]. Disponible a: <<http://pandas.pydata.org/>>.

[18] Matplotlib. Python 2D Plotting Library [en línia]. Matplotlib, 2017 [Última consulta: Octubre 2017]. Disponible a: <<http://matplotlib.org/>>.

## **Annex**

En el següent enllaç podreu trobar el codi emprat per realitzar la anàlisi d'aquest treball:

<https://drive.google.com/drive/folders/0B7kRc5Gp0e3aSk04M3dkMXdaSHM?usp=sharing>